

Institut für Diagnostik
und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht DD 60/2008

Nutzungsorientierte, optimierte Lokalterperierung von Kirchen - modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung

Abschlussbericht

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 24824



Berichterstattung:
Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.
Dr. rer. nat. Christoph Franzen
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

mit Beiträgen der Kooperationspartner:
Dipl.-Rest. Christine Kelm, LfDS
Dipl.-Ing. Uwe Meinhold, TUD

Dresden, den 30.03.2009

Seitenzahl einschl. Titelblatt: 129

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden
Tel.: 0351-48430-408/09/10/27
Fax.: 0351-48430-468

Internet: www.idk-info.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle
Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-info.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Stefan Weise

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 201 140 11356

Ust-ID: DE234216408

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	24824/	Referat	Klimaschutz und Energie	Fördersumme	27.900,00
Antragstitel		Nutzungsorientierte optimierte Lokalterperierung in Kirchen - modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung			
Stichworte		Temperierung, Denkmalnutzung, Kirche, Bauklimatik			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	07/07	12/08	1		
Zwischenberichte	2				
Bewilligungsempfänger		Kloster St. Marienstern Zisterzienserinnen-Abtei Frau Äbtissin Waurick Cisinskistr. 35 01920 Panschwitz Kuckau		Tel 035796/99412 Fax 035796/99455	Projektleitung J. Lukasch Bearbeiter Dr. C. Franzen
Kooperationspartner		Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Schlossplatz 1, 01067 Dresden, Dipl.-Ing. Stefan Weise, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther, Dr. Christoph Franzen Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 01062 Dresden, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roff, Dipl.-Ing. Uwe Meinhold Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Abteilung Restaurierung, Schloßplatz 1, 01067 Dresden, Dipl.-Rest. Christine Kelm			
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Historische Bauten in massiger Bauweise und zum Teil großen Raumvolumina stellen eine besondere Herausforderung bei der Optimierung des Energieeintrages dar. Die rezente Nutzung dieser Räume ist eine Grundlage ihrer Erhaltung und erfordert gleichzeitig aktive bauklimatische Maßnahmen, um diese Nutzung zu ermöglichen. Eine zukünftige Nutzung ist ausschließlich sinnvoll möglich, wenn der aktuelle Energieeinsatz gemindert werden kann. Die Folgen eines gezielt geminderten Energieeintrages in einen umbauten Raum wie der Klosterkirche Marienstern mit historischer Innenausstattung sind nur über Simulationen, die auf belastbaren Messdaten aufbauen, einzuschätzen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Zunächst werden die nutzungsbedingenden Einflüsse der Raumklimatik erfasst und der Energieeintrag quantifiziert. Über Messungen wird die aktuelle Bauklimatik im Kirchenraum erfasst. Die Ergebnisse der klimatischen Messungen gehen in eine Computersimulation ein, die die zukünftige Situation mit geändertem Temperierungssystem und gemindertem Energieeintrag darstellen soll.</p> <p>Teile eines möglichen neuen Temperierungssystem werden in einem Muster in die Klosterkirche installiert und die Behaglichkeitskriterien für die Nutzer erfasst. Über die frühe Einbindung weiterer Experten auf dem Gebiet der Kirchentemperierung und Kunstgutgefährdung durch Klima werden vorhandene Ergebnisse anderer Forschungsprojekte bestmöglich mit eingebunden.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small>					

Ergebnisse und Diskussion

In der ersten Projektphase wurde der enge Zusammenhang zwischen der starken Verschwärzung der Innenwände und dem Heizungssystem respektive dem Luftströmungsverhalten, dass durch die Beheizung wesentlich bestimmt wird, deutlich. In der Folge kam der Erfassung des Luftströmungsverhaltens eine größere Bedeutung zu. Die Kerzen konnten als ein möglicher Partikeldonator ausgemacht werden und eine Änderung zu Kerzen höherer Güte wurde veranlasst. Ein sinnvoll gestaltetes Messprogramm von Klimawerten an verschiedenen Raumpunkten, Behaglichkeitsmessungen und Rauchversuchen ermöglichen eine Beschreibung der Verhältnisse in der Klosterkirche. Die raumklimatischen Untersuchungen der Klosterkirche St. Marienstern hatten zur Aufgabe, die bestehende klimatische Situation im Kirchenschiff zu erfassen und zu bewerten. Gleichzeitig wurde der Einfluss der Beheizung, der Nutzer und des Außenklimas auf den Kirchenraum beurteilt. Dazu erfolgten vier verschiedene messtechnische Untersuchungen. So wurde das Raumklima an unterschiedlichen Messbereichen des Kirchenschiffs erfasst. Diese Messbereiche waren: Außenbereich, Messachse Südwand – Gewölbepfeiler – Nordwand und Messachse Gewölbeunterseite - mittlere Raumhöhe - Besucherbereich. Aus diesen Daten konnten dann für einen Jahreszyklus Aussagen über die raumklimatischen Zustände in der Klosterkirche über die Gebäudebreite und -höhe getroffen werden. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch Messungen der Luftströmungen und der Luftwechselrate des Raumes. Für die Erarbeitung der Neukonzeption der Beheizung des Kirchenschiffs, war es außerdem wichtig das bestehende „Behaglichkeitsgefühl“ der Nutzer zu erfassen. Dazu erfolgte eine Behaglichkeitsmessung an verschiedenen Sitzbereichen im Kirchenschiff. Es wurden verschiedene Strategien der Sicherung oder Verbesserung der Behaglichkeit mit den Schwestern als häufigste Nutzer und anderen Nutzergruppen diskutiert. Es wurden sowohl theoretische Modelle als auch provisorische Modellbauten erarbeitet, um mit den Nutzern die konservativen und modernen Strategien zur Beheizung und Behaglichkeit zu erörtern. Auf der Basis der raumklimatischen Messdaten wurden Computersimulationen des Innenklimas zur Bestimmung des Heizungssystems durchgeführt und ausgewertet. Erste technische Rahmenbedingungen für eine Konzeption und Dimensionierung der neuen Raumheizung sind mit diesen Untersuchungen festgelegt. Die Zuführung eines Teiles der Wärme sehr nah am Nutzer zur Reduzierung der mittleren Raumlufttemperatur erscheint sinnvoll. Zusätzlich muss aber auch dafür gesorgt werden, dass Wärme an den bauphysikalisch kritischen Bereichen der Außenwände zugeführt wird. Zum einen sollte möglichen Feuchteschäden vorgebeugt werden, zum anderen ist es notwendig, die Wärme nicht punktuell oder zentral sondern weit verteilt einzubringen. Dies soll einem ungünstigen Raumluftströmungsverhalten entgegenwirken.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die lokale Presse wurde über den Projektverlauf und die Expertentreffen informiert. Durch die frühe Einbindung weiterer Experten in das Projekt wurde das Projekt als solches, die modellhafte Vorgehensweise für die Voruntersuchungen und die Ergebnisse der Messungen in der Fachwelt bekannt gemacht. Mehrere Informationstexte Fachveröffentlichungen wurden vorbereitet und kommen 2009 heraus (bsp. Denkmalschutz Informationen herausgegeben vom Deutschen Nationalkomitee für Denkmalschutz; Jahrbuch 2008 des Landesamtes für Denkmalpflege, erscheint voraussichtlich Mai 2009; Seminar „Bauklimatik im Bestand: Kirchenheizung“ an der Denkmalakademie der Deutschen Stiftung Denkmalschutz am 8. Mai 2009)

Fazit

In dem Projekt wurde modellhaft aufgezeigt, wie mit einem überschaubaren Aufwand in einem großen Denkmalgebäude das Bauklima erfasst und die speziellen Probleme und Charakteristiken aufgezeigt werden können. Ein gezielt geplantes Messprogramm kann die Bestandssituation problemorientiert abbilden. Innenraumklimasimulationen mit moderner Software können zur Bestimmung des Heizsystems und der Regelstrategie eingesetzt werden. Im Spannungsfeld von Nutzung und Kosten, von Erhaltung und Pflege bleibt der Einbau jeder Heizung in ein Denkmal eine schwierige Aufgabe. Sowohl für spezielle Gestaltung einer nachhaltigen Heizungsanlage in dieser Klosterkirche als auch allgemein für das Wissen und den problemorientierten Umgang mit den Fragestellungen des Klimas in historischen Bauten hat das Vorhaben wichtige und übertragbare Erkenntnisse erarbeitet.

2 Inhaltsverzeichnis

1	Projektkennblatt	1
2	Inhaltsverzeichnis	3
3	Abbildungsverzeichnis	4
4	Tabellenverzeichnis	7
5	Projektpartner	8
6	Zusammenfassung	9
7	Einleitung	11
7.1	Zisterzienserinnen-Abtei St. Marienstern – Geschichte und Gegenwart	11
7.2	Klosterkirche – Bedeutung und Rang des Bauwerks	11
7.3	Projektvorhaben	12
7.4	Umweltrelevanz	13
7.5	Zielsetzung des Vorhabens	13
7.6	Innovativer Charakter des Projektes	15
8	Historische Warmhaltestrategien	16
9	Schadensaufnahme	24
9.1	Geschichte der Innenraumfassungen	24
9.2	Klimabedingte Schäden an der Ausstattung	25
9.3	Verschwärzungserscheinungen an den Wänden und im Gewölbe	25
9.4	Erklärungsmodelle und -ansätze	30
9.5	Konsequenzen	34
10	Nutzungsdefinitionen	36
11	1. Expertentreffen	38
12	Bestehende Heizungsanlage in der Klosterkirche	44
13	Raumklimatische Untersuchungen	47
13.1	Messkonzept	47
13.2	Raumklimamessungen	48
13.3	Messung von Luftströmung / Rauchversuche	56
13.4	Behaglichkeitsmessungen	60
13.5	Bestimmung der Luftwechselrate mit CO ₂	63
13.6	Fazit	65
13.7	IR-Thermographie	67
14	Testbauten an dem Chorgestühl und den Bänken	77
14.1	Chorgestühl	77
14.2	Musterumbau	77
14.3	Visualisierung	78
14.4	Musterbank	81
14.5	Umfrage	84
15	Innenklimasimulationen	85
15.1	Einführung	85
15.2	Bestimmung der zu installierenden Heizleistung im Kirchenraum	85
15.3	Einsatz von Raumklimasimulationen	87
15.4	Zusammenfassung zum Innenklima	96
15.5	Aussichten	97
16	2. Expertentreffen	98
17	Empfehlungen	103
18	Literaturverzeichnis	105
Anlagen		22 Seiten

3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Klosterkirche St. Marienstern	11
Abb. 2	Die Klosterkirche bildet den nördlichen Abschluss der Klosteranlage. Das südliche Querschiff stellt den nördlichen Teil des Kreuzgangs dar. Der mit dem Kirchenraum verbundene obere Teil bildet die so genannte Chorgasse zum bis 1965 genutzten westlichen Nonnenchor. (Plangrundlage: Dehio 1996)	12
Abb. 3	Schematische Darstellung einer Wärmekugel aus dem Skizzenbuch des Villard de Honnecourt (um 1235) f ol. 9v, Paris Bibliotheque Nationale De France Ms Fr 19093	20
Abb. 4	Wärmeapfel mit der Darstellung der artes, spätes 12. Jh., Maasgebiet, Musée de Cluny, inv. Nr. 17703	20
Abb. 5	Glücksrad des schlechten Mönchs, Sammelhandschrift, Kloster Heiligenkreuz, Beginn des 13. Jh., fol. 146r, Stiftsbibliothek Heiligenkreuz, Cod. 226	20
Abb. 6	Totenofficium, Miniatur aus dem Stundenbuch der Maria Stuart, Frankreich, 2. V. 15. Jh., fol. 110r, Eremitage. Lat. Q. v. I, 112	20
Abb. 7	Der Heilige Franziskus, Miniatur aus dem Stundenbuch der Maria Stuart, Frankreich, 2. V. 15. Jh., f ol. 167v, Eremitage. Lat. Q. v. I, 112	21
Abb. 8	Thomas von Aquin von Schülern umgeben, Miniatur aus der Summa Theologiae	21
Abb. 9	Kalenderminiatur aus dem Stundenbuch des Simon de Varie, Frankreich, Mitte 15. Jh., Den Haag, Koninklijke Bibliotheek, 74 G 37a.	21
Abb. 10	Verkündigung, Minatur aus einer Weltchronik, Österreich, 3. V.15. Jh., fol. 232v, Österreichische Nationalbibliothek ; cod. 2766	21
Abb. 11	Verkündigung, Tafelmalerei, Oberösterreich um 1500, Stiftsgalerie Kremsmünster 22	
Abb. 12	Mitglieder der Familie Fuchshart beim Gebet, Ausschnitt aus einem Flügelaltar von Herlein Friedrich, 1462, Nördlingen, Stadtmuseum	22
Abb. 13	Mantel mit Pelzfutter	23
Abb. 14	Wanddecke	23
Abb. 15	Pelzfußsack	23
Abb. 16	Pelzfußsack	23
Abb. 17	Fassungserneuerungen auf einer Zeitachse aufgetragen	24
Abb. 18	Blick in die Klosterkirche, 1965, die Ausschnittvergrößerungen zeigen deutlich die Schmutzfahnen an den Wänden	26
Abb. 19	Schmutzfahnen an der Südwand, 1965	27
Abb. 20	Verschwärzung über Heizkörper	27
Abb. 21	Vergrauung über gesamte Wandfläche	27
Abb. 22	Schwarzfärbung über Heizrohrbefestigung	28
Abb. 23	Abdeckblech oberhalb eines Heizkörpers	28
Abb. 24	Schwarzfärbung über Heizrohrbefestigung	28
Abb. 25	nach Abbau des Bleches	28
Abb. 26	Ausschnitt aus Abb. 20	29
Abb. 27	Verschwärzung oberhalb Heizkörper	29
Abb. 28	Gewölbeverschmutzung	29
Abb. 29	Gewölbeverschmutzung	29
Abb. 30	Gewölbeverschmutzung	29
Abb. 31	Gewölbeverschmutzung	29
Abb. 32	Rußgeschwärztes Spinnewebe im Gewölbe	29
Abb. 33	Fugennachzeichnende Gewölbeverschmutzung	29
Abb. 34	heller Gewölbefuß (Ausschnitt aus Abb. 28)	33
Abb. 35	heller Gewölbefuß (Ausschnitt aus Abb. 29)	33
Abb. 36	Kerze in der Klosterkirche, aufgestellt im östlichen Nordschiff	34
Abb. 37	bei bewegter Flamme entsteht viel Ruß	34
Abb. 38	Verschwärzung verschmiert auf der Oberfläche	34
Abb. 39	... und bleibt teilweise haften	34
Abb. 40	Vergrautes Fugenbild	34
Abb. 41	Risse zwischen Fuge und Ziegel intensiv verschwärzt	34
Abb. 42	Reinigungsmusterflächen	35

Abb. 43	Reinigung im Gewölbe	35
Abb. 44	Zonenteilung der Klosterkirche.....	37
Abb. 45	Anordnung der Heizkörper in der Klosterkirche St. Marienstern / rot – Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore; grün – Heizkörper im Kirchenschiff (Bankreihen haben keine Heizkörper) / Die Zahlen werden in den weiteren Abbildungen erläutert	44
Abb. 46	altes Heizhaus.....	45
Abb. 47	Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort: 8x Nordwand, 1x hinter Altar, Nr. 1 in Abb. 45	45
Abb. 48	offen verlegte Heiztrasse, für Versorgung der Heizkörper an der Nordwand, Durchmesser: 8 cm, Einbauort: hinter Altar, Nr. 2	45
Abb. 49	Fußbodenheizung vor dem Altar, für Lokalterperierung des Priesters bei Gottesdiensten, Nr. 3	45
Abb. 50	Fußbodenheizung im Chorgestühl, verlegt unter Holzpodest, Nr. 4.....	45
Abb. 51	meanderförmig verlegte Heiztrasse, Durchmesser 8 cm, Einbauort: an Südwand im 3. und 4. Joch, Nr. 5.....	45
Abb. 52	Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort: 2x an der Südwand unter Empore in Wandnischen, Nr. 6	46
Abb. 53	Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort: 5x an der Südwand auf der Chorgasse, 2x an der Westwand auf der Chorgasse und der Nonnenempore, Nr. 7.....	46
Abb. 54	Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit den Messpunkten der Raumklimamessung	48
Abb. 55	Messpunkt 1	49
Abb. 56	Messpunkt 2	49
Abb. 57	Messpunkt 3	49
Abb. 58	Messpunkt 4	50
Abb. 59	Messpunkt 5	50
Abb. 60	Messpunkt 6	50
Abb. 61	Messpunkt 7	51
Abb. 62	Messpunkt 8	51
Abb. 63	Messpunkt 9	51
Abb. 64	Messpunkt 10	52
Abb. 65	Messpunkt 11	52
Abb. 66	Messpunkt 12	52
Abb. 67	Messpunkt 13	53
Abb. 68	Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit den Messpunkten Luftströmungsmessung.....	56
Abb. 69	Luftströmungsmessung Nordwand.....	57
Abb. 70	Luftströmungsmessung Gewölbepfeiler	57
Abb. 71	Strömungsprüfröhrchen im Einsatz	58
Abb. 72	visualisierte Luftbewegung in der Klosterkirche (vereinfacht dargestellt).....	59
Abb. 73	Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit dem Messpunkt der Behaglichkeitsmessung	60
Abb. 74	Behaglichkeitsmessung im Bereich der Bankreihen	61
Abb. 75	Aufbau einer Behaglichkeitsmessstation:.....	61
Abb. 76	Ergebnis der Behaglichkeitsmessung am 24.02.2008 um 9:45 Uhr.....	62
Abb. 77	Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit dem Messpunkt der CO ₂ - Konzentration	63
Abb. 78	Messpunkt der CO ₂ – Konzentration der Raumluft	64
Abb. 79	IR-Untersuchungen im Kirchenschiff	67
Abb. 80	IR-Untersuchungen am Chorgestühl.....	67
Abb. 81	Nordwand, Fenster im 3. Joch von Westen	68
Abb. 82	IR-Aufnahme zu Abb. 81	68
Abb. 83	Nordwand, Heizkörper im 3. Joch von Westen	68
Abb. 84	IR-Aufnahme zu Abb. 83	68
Abb. 85	Nordwand, 3. Joch, unterhalb Fenster	69
Abb. 86	IR-Aufnahme zu Abb. 85	69
Abb. 87	Nordwand, 3. Joch, oberhalb Heizkörpern	69

Abb. 88	IR-Aufnahme zu Abb. 87	69
Abb. 89	Nordwand, 3. Joch von Osten, Epitaphe	70
Abb. 90	IR-Aufnahme zu Abb. 89	70
Abb. 91	Südwand, rechts vom Chorgestühl	70
Abb. 92	IR-Aufnahme zu Abb. 91	70
Abb. 93	Gewölbe	71
Abb. 94	Altar, von der Empore aus	71
Abb. 95	Empore	71
Abb. 96	Chor, von der Empore aus	71
Abb. 97	Im Kreuzgang	72
Abb. 98	IR-Aufnahme zu Abb. 97	72
Abb. 99	Im Kreuzgang	72
Abb. 100	IR-Aufnahme zu Abb. 99	72
Abb. 101	Foto zu Abb. 102, südliches Chorgestühl, von Westen	73
Abb. 102	Versuchsbeginn im südlichen Chorgestühl	73
Abb. 103	Foto zu Abb. 104, südliches Chorgestühl, von Westen	73
Abb. 104	Dummy im südlichen Chorgestühl	73
Abb. 105	Foto zu Abb. 106	74
Abb. 106	südliches Chorgestühl, von Westen	74
Abb. 107	Foto zu Abb. 108	74
Abb. 108	nördliches Chorgestühl, von Westen	74
Abb. 109	Foto zu Abb. 110	74
Abb. 110	nördliches Chorgestühl, von Westen	74
Abb. 111	Foto zu Abb. 112, nördliches Chorgestühl, von Westen	75
Abb. 112	ungleichmäßige Fußbodenheizung im Chorgestühl	75
Abb. 113	Foto zu Abb. 114, Detail	75
Abb. 114	Fußbereich am Dummy erwärmt	75
Abb. 115	Foto zu Abb. 116, nördliches Chorgestühl, von Westen	75
Abb. 116	Fußbodenheizung	75
Abb. 117	Foto zu Abb. 118, nördliches Chorgestühl, von Westen	75
Abb. 118	Wärmeverluste in hinteren Bankteilen	75
Abb. 119	Foto zu Abb. 122, nördl. Chorgestühl von Osten	76
Abb. 120	Stark heterogene Wärmeverteilung an den Fußbodenfeldern des Chorgestühls ..	76
Abb. 121	Foto zu Abb. 122, Dummy im Musterumbau	76
Abb. 122	Dummy im Musterumbau	76
Abb. 123	Gestühl auf der Nonnenempore	77
Abb. 124	Gestühl während der Baumaßnahme	77
Abb. 125	Provisorischer Testumbau am Chorgestühl, Nordseite	77
Abb. 126	Provisorischer Testumbau am Chorgestühl, Südseite	77
Abb. 127	Provisorischer Testumbau am Chorgestühl, Nordseite, mit Seitentür	78
Abb. 128	Provisorischer Testumbau am Chorgestühl, Südseite, mit Seitentür	78
Abb. 129	Visualisierung eines Umbaus am Chorgestühl mit (halb-)transparenten Material (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)	78
Abb. 130	Visualisierung eines Umbaus am Chorgestühl mit Holz (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)	79
Abb. 131	Visualisierung einer mobilen Vorhangrückwand (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS) ..	79
Abb. 132	Visualisierung einer mobilen Rückwand mit Stoffbespannung (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)	80
Abb. 133	Musterbank	81
Abb. 134	Musterbank	81
Abb. 135	Musterbank mit Sitzheizung	81
Abb. 136	Musterbank	81
Abb. 137	unmaßstäbliche Zeichnung vom System „CANDOR“	82
Abb. 138	Trafo unter der Musterbank	82
Abb. 139	Aufbau der Heizelemente Quelle: Candor-Prospekt	82
Abb. 140	unmaßstäbliche Zeichnung vom System „BRETSCHEIDER“	83
Abb. 141	Methode der qualifizierten Gebäudesimulation bei bestehenden Gebäuden	89

Abb. 142	Darstellung der berechneten und gemessenen Temperaturen	89
Abb. 143	Darstellung der berechneten und gemessenen Temperaturen und rel. Luftfeuchte (konstanter Luftwechsel)	90
Abb. 144	Schematische Darstellung der Diskretisierung des Diffusionsmodells	91
Abb. 145	Darstellung der Integration zwischen dem Gebäudemodell TRNSYS-Type 56 (Kirche) und dem Hygrischen Speichermodell in der Darstellung der Softwareoberfläche „Simulation Studio“	91
Abb. 146	Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur ohne Heizung	92
Abb. 147	Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur mit Heizung (auf 10°C) (Heizleistung 81 kW)	93
Abb. 148	Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur mit Heizung (auf 10°C) (Heizleistung 50 kW)	93
Abb. 149	Verdeutlichung des Heizenergiebedarfes (farbige Flächen charakterisieren den Heizwärmebedarf) bei unterschiedlichen Raumtemperaturen während der Heizperiode	95
Abb. 150	Verlauf der sich einstellenden rel. Feuchte bei unterschiedlichen Heizsolltemperaturen	96

4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Nutzungszeiten der Klosterkirche ohne Sonn- und Feiertage	36
Tab. 2	Ausgewählte Bankheizsysteme	83
Tab. 3	Randbedingungen für eine klassische Auslegung der Heizleistung	86
Tab. 4	Anteile an der Heizleistung bei einer klassischen Auslegung für den Kirchenraum	86
Tab. 5	Anteile an der Heizleistung bei einer angepassten Auslegung	87
Tab. 6	Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Innenraumtemperaturen während der Heizzeit ($n = 0.2 \text{ h}^{-1}$)	94

5 Projektpartner

Antragsteller und Projektleitung

Zisterzienserinnen-Abtei Klosterstift Marienstern, Cisinskistr. 35, 01920 Panschwitz-Kuckau, Äbtissin Sr. Benedicta Waurick, tel.: 035796/9930, verwaltung@marienstern.de
Dipl.-Ing. (FH) für Bauwesen, Fachingenieur für Denkmalpflege, Johannes Lukasch, Klosterstift Marienstern, tel.: 035796/99412



Projektsteuerung und Klimamessungen

Dr. Christoph Franzen, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK), Schlossplatz 1, 01067 Dresden, www.idk-info.de, franzen@idk-info.de, tel.: 0351/4914410



Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Schlossplatz 1, 01067 Dresden, loether@idk-info.de, tel.: 0351/48430427



Restauratorische und Denkmalpflegerische Begleitung

Dipl.-Rest. Christine Kelm, Abteilung Restaurierung, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen (LfDS), Schloßplatz 1, 01067 Dresden, tel.: 0351/48430416



Computersimulation

Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 01062 Dresden, Tel: 0351 4633 2950, Dipl.-Ing. Uwe Meinhold, meinhold@tu-dresden.de



6 Zusammenfassung

In der Klosterkirche St. Marienstern in Panschwitz-Kuckau in Sachsen wurden beispielgebend Voruntersuchungen durchgeführt, um den Umbau der Heizungsanlage in ein energieeffizientes Beheizungssystem zu ermöglichen. Ein gezielter Katalog von Messungen ermöglichte die aktuelle Situation in dem historischen Bau zu erfassen. Über Rauchversuche konnte die komplexe Strömungssituation der Luft dargestellt und durch gezielte Strömungsmessungen der negative Einfluss auf die Behaglichkeit an konkreten Orten nachgewiesen werden. Klimamessungen über einen längeren Zeitraum nehmen die Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen auf. Der Bau wurde in Zonen unterschiedlicher Nutzung eingeteilt. Die zwar im Grundsatz ständige Nutzung verteilt sich in dem großen Innenraum auf verschiedene Bereiche und Zeiten. Es wurden Simulationsrechnungen zur Bestimmung des Heizungssystems und der Regelstrategie eingesetzt. Dafür wurde aus den geometrischen und baukonstruktiven Parametern des Kirchenbaues wurden ein Einzonenmodell für ein Simulationsprogramm erstellt. Die berechneten Werte wurden mit den Verbrauchsmessungen und den Innenklimamessungen verglichen. In einem zweiten Schritt kann der Innenraum der Kirche in mehrere Zonen unterteilt werden, um die unterschiedlichen Nutzungsbereiche wie Chorgestühl, Kirchenbankreihen oder den Bereich über dem Kreuzgang genauer abzubilden. Im Ergebnis konnte die thermische Behaglichkeit in den Zonen Chorgestühl und normale Kirchenbankreihen bestimmt und Aussagen zu den Heizleistungen der einzelnen Heizsysteme und deren Regelungskonzept getroffen werden. Ergänzt wurden die Untersuchungen mit IR-Thermographie, Behaglichkeitsmessungen und CO₂-Untersuchungen. Ein derart vernetztes Vorgehen mit größtenteils bekannten Einzelverfahren zur Darstellung der Situation an einem wichtigen Denkmal ist richtungweisend und modellhaft. Am untersuchten Beispiel der Klosterkirche St. Marienstern wird damit demonstriert wie die oben genannten Verfahren hervorragend ergänzend in einander übergreifen. In einem kommenden Schritt sollten die Ergebnisse noch weiter und tiefer in die konkrete Heizungsplanung einfließen. Ebenso wird empfohlen nicht nur den Einbau messtechnisch dokumentativ zu begleiten, sondern die Maßnahme und ihre „Auswirkungen“ hinreichend zu auf zu zeichnen. Es liegt hier nun der seltene Fall vor, dass jetzt im Vorfeld dieser Maßnahme eine gute Dokumentationsbasis des Vorzustandes vorliegt. Nur auf Grund dieser Angaben kann es in Zukunft möglich sein die Veränderungen durch den Heizungseinbau stichhaltig nachzuweisen. Diese Chance sollte unbedingt genutzt werden, um weitere und bessere Erkenntnisse, die dann auch für die vielen vergleichbaren Aufgaben, die auf uns in Zukunft an sehr vielen Denkmälern in Deutschland und darüber hinaus zukommen werden, übertragen zu können.

Mit dem bisherigen Heizsystem in der Klosterkirche St. Marienstern war auch eine intensive Verschmutzung der Wände mit Schwarzstaub verbunden. Ein enger Bezug der Verschmutzung zu den lang anhaltenden Luftströmungen im Raum konnte belegt werden. Diesen kann ausschließlich mit dem Versuch entgegnet werden, durch direkte Wärmezufuhr ganz nah am Nutzer, gemäß dem Konzept aus dem EU-Projekt „friendly-heating“ zu begegnen. Dieses Konzept versucht dabei das größere Raumluftvolumen zu wenig wie möglich zu beeinflussen. Ein Ziel des EU-Projektes war dabei, das hochrangige Kulturgut durch die verringerten Zyklen auch wesentlich geringer zu gefährden. Ein solcher Ansatz ist etwas erweitert auch für Marienstern übertragbar. Hier geht es dabei nicht nur um die einzelnen Ausstattungsstücke, die durch ein gedämpftes Klima besser erhalten werden können, sondern vielmehr um die Reduzierung der Verschmutzung, die neben der Gefährdung für die Kunstgegenstände, hohe Kosten bei der Raumerneuerung verursachen. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass Bankheizungssysteme schon sehr lange eingesetzt werden und auch Systeme angeboten werden, deren Grenzen sich deutlich abzeichnen, liegt hier noch ein hohes Innovationspotential.

Die baulichen und damit auch optisch und haptisch für die Nutzer wahrnehmbaren Veränderungen wurden mit den Nutzern immer wieder diskutiert. Der enge Einbezug der Nutzer in die Planungsmaßnahme ermöglichte die Diskussion darüber, dass es sehr wahrscheinlich durch die Energiereduktion absolut gesehen kälter werden wird, dass dies trotzdem mit einer Erhöhung der Behaglichkeit konform gehen kann. Außerdem konnte nur durch Rücksprache mit den Schwestern erreicht werden, dass liturgische Anforderungen nicht verletzt wurden. Dieses nutzereinbindende und nutzerorientierte Vorgehen kann als beispielhaft im Bereich monumentalen Denkmalbauwerks bezeichnet werden.

Das Projekt zeigt modellhaft, wie ausschließlich durch eine lange Vorbereitung mit der Beteiligung unabhängiger Fachleute eine nachhaltiger Energie- und Ressourceneinsatz in einem historischen Großgebäude erreicht werden kann. Diese Aufgabe stellt sich mit ganz ähnlichen Fragestellungen derzeit und in naher Zukunft an sehr vielen Denkmälern in Deutschland. Durch das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt „Nutzungsorientierte, optimierte Lokalterperierung von Kirchen - modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung“ wurden erfolgreich wichtige Ansätze für diese zukünftigen Aufgaben erarbeitet.

7 Einleitung

7.1 Zisterzienserinnen-Abtei St. Marienstern – Geschichte und Gegenwart

St. Marienstern ist zusammen mit dem ebenfalls in der Oberlausitz gelegenen St. Marienthal das älteste ununterbrochen bestehende Zisterzienserkloster in Deutschland. Seit 1248 lebt hier eine Schwesterngemeinschaft, die sich in allen Zeiten behaupten konnte. Gelegen an einem wichtigen Übergang der alten Via Regia oder Hohen Strasse über den kleinen Fluß Klosterwasser spielte die zwischen Kamenz und Bautzen gelegene Abtei für die Landesgeschichte der Oberlausitz eine zentrale Rolle. Als kulturelles Zentrum prägte die geistliche Institution über Jahrhunderte ein weites Umfeld, technische und wirtschaftliche Innovationen, Schriftkultur und moderne Verwaltungsmethoden strahlten von hier aus. Für die sorbische Kultur war das Kloster als bewahrende Instanz von größter Bedeutung, ebenso für die Überlieferung religiöser Werte, wobei seit jeher hier Toleranz pragmatisch gelebt und ausgeübt wurde. Die bedeutende Architektur und die einzigartige Ausstattung des Klosters sind Ausdruck der traditionsreichen Vergangenheit und der großen Bedeutung. St. Marienstern stellt heute als lebendiges Kloster mit einer jahrhundertealten Bausubstanz, reichem Kunstbesitz einen historischen Ort von weit überregionalem Rang dar. Durch die engen Verbindungen mit Böhmen und auch mit Schlesien steht das Kloster in einem europäischen Bezugssystem.



Abb. 1 Klosterkirche St. Marienstern

7.2 Klosterkirche – Bedeutung und Rang des Bauwerks

Die Klosterkirche von St. Marienstern gehört zu den wichtigsten Sakralbauten des Mittelalters im mitteldeutschen Raum. Sie ist eine dreischiffige Halle, deren Südschiff in einmaliger Weise geteilt ist. Der untere Bereich des Südschiffs dient als Kreuzgang, der obere als Zugang der Schwestern zum westlichen Nonnenchor.

Erbaut zwischen 1250 und 1300 stellt die Kirche zusammen mit dem Dom zu Meißen das bedeutendste Bauwerk des 13. Jahrhunderts in Sachsen dar. Impulse aus Schlesien und Böhmen, zisterziensische Bautradition und modernste Innovation führten hier zu einer einzigartigen Synthese. Dank der Freilegung der originalen Raumgestalt und Raumfarbigkeit anlässlich der letzten umfassenden Innenrestaurierung 1966–1968 vermittelt die Kirche in einmaliger Weise

eine Vorstellung von zisterziensischer Ästhetik der Frühgotik. In allen wichtigen Publikationen zum Thema wird der Bau entsprechend gewürdigt.

Zum architektonischen Rang gesellt sich eine künstlerische Ausstattung, die ebenfalls von höchster Bedeutung ist. Glasmalerei des 13. und 14. Jahrhundert, Andachtsbilder der Gotik, drei spätgotische Flügelaltäre sowie kostbare Werke barocker Bildhauerkunst und Malerei stellen zusammen mit dem Kirchenschatz ein Ensemble dar, das seinesgleichen in Sachsen und Mitteleuropa nicht mehr hat. Zu Recht gilt diese künstlerische Ausstattung, die ebenso von böhmischen wie von sächsischen Traditionen geprägt ist, sowohl in ihren einzelnen Bestandteilen mit zahlreichen Spitzenwerken als auch als Gesamtheit zum wertvollsten kirchlichen Kunstbesitz Mitteleuropas überhaupt.

Durch die Erste sächsische Landesausstellung 1998 wurde die diesbezügliche Bedeutung von St. Marienstern erstmals einem größeren Publikum vermittelt; seither ist St. Marienstern in der internationalen Forschung ein fester Begriff.

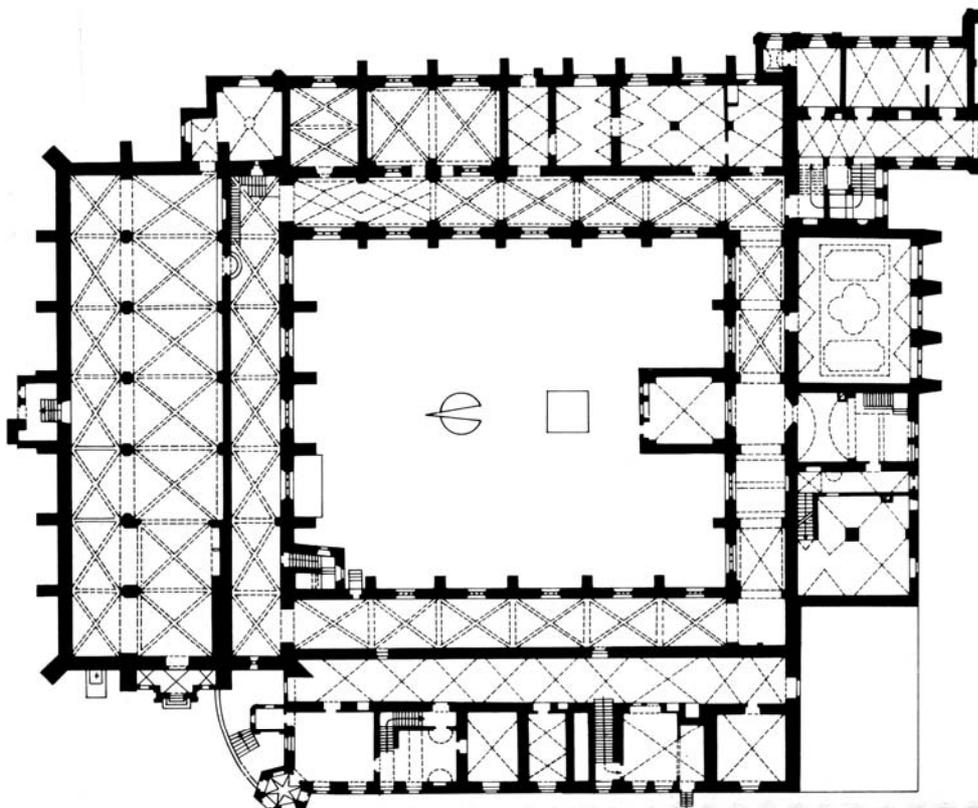


Abb. 2 Die Klosterkirche bildet den nördlichen Abschluss der Klosteranlage. Das südliche Querschiff stellt den nördlichen Teil des Kreuzgangs dar. Der mit dem Kirchenraum verbundene obere Teil bildet die so genannte Chorgasse zum bis 1965 genutzten westlichen Nonnenchor. (Plangrundlage: Dehio 1996)

7.3 Projektvorhaben

Die Klosterkirche Marienstern steht vor einer Herausforderung, die kennzeichnend ist für viele historische Monumentalbauten in Europa. Der bauzeitlich als Kaltbau errichtete Baukörper wird bis heute kontinuierlich genutzt und ein zukunftsorientiertes Nutzungskonzept ist aufgestellt. Es basiert allerdings auf der Grundlage moderner Behaglichkeitskriterien, der Einsatz eines Systems zur Temperaturregulierung ist unabdingbar. In dem Projekt soll vorbereitend zu einem notwendigen Umbau des Heizungssystems ein System zur Temperaturregulierung angepasst werden, das im Bezug auf Verbrauch und Ausbeute optimal auf den Nutzen und die Nutzer angepasst ist. Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen ist dieses optimaeffektiv zu konzeptionieren.

Das Projekt hat Modellcharakter, da die geringenergetische Beheizung von historischen Monumentalbauten eine sehr häufige Herausforderung in den kommenden Jahren darstellt und die vom modernen Hochbau entwickelten Lösungen nur eingeschränkt angewendet werden kön-

nen. Für ursprüngliche Kaltbauten, wie viele historische Bauten sich darstellen, müssen Lösungen entwickelt werden, die weniger zum Ziel haben, den Bau in einen Warmbau umzustellen als vielmehr den Energieeintrag so gering und effektiv wie möglich zu halten. Am Beispiel der Klosterkirche in Marienstern soll gezeigt werden, wie durch konsequente Reduktion des Energieeinsatzes ausschließlich der Teil des Raumes angegangen wird, der für die aktuelle Nutzung relevant ist. Dies hat eindeutig Konsequenzen nicht nur für den Energieeinsatz oder Energieverbrauch sondern für das Gesamtklima des Bauwerkes. Das Bauklima ist in den vergangenen hundert Jahren stark verändert worden und eine weitere drastische Änderung ist mit Rücksicht auf die historisch wertvolle Ausstattung nur behutsam möglich. Daher müssen die Auswirkungen der Änderung des Systems vorher abgeschätzt, simuliert und evaluiert werden, bevor das Ziel der Energieeinsparung auf Kosten der historischen Substanz erreicht würde und es somit im Ergebnis zu unwiederbringliche Verlusten käme.

7.4 Umweltrelevanz

Bei knapper werdenden Energieressourcen wird es immer wichtiger, leistungseffizient die Energie einzusetzen. Historische Monumentalbauten entsprechen nicht den Anforderungen, die der moderne Wärmeschutz vorsieht und können auch nicht diesen Anforderungen angepasst werden. Eine Anpassung ist zum Teil unmöglich oder aber hochproblematisch, da die bestehende Sanierungskonzepte für moderne Hochbauten sehr tief in die historische Substanz eingreifen würden. Auch lassen sich historische Lüftungskonzepte nur unter großem Aufwand gegen moderne Systeme austauschen. Im Projekt wird hingegen versucht das historische Konzept aufzugreifen, die Veränderungen so gering wie möglich halten und moderne, energieintensiv hergestellte Wärmeschutzstoffe nur ganz gezielt einzusetzen. Das umweltrelevante Ziel des Projektes ist es, die Wärmeenergie in ganz geringen Anteilen und ganz gezielt im Bezug auf Zeit und Raum in das großvolumige Objekt einzutragen, bei gleichzeitiger Gewährleistung des Erhaltes der historisch wertvollen Ausstattung. Es kommt zu einer Umweltentlastung durch die geringe Energieverwendung im Vergleich zum aktuellen Zustand. In einschlägigen Regelungen und Verordnungen nehmen nur unzureichend Rücksicht auf den historischen Baubestand. Beispielweise werden die Eigenschaften der verbauten historischen Materialien nicht berücksichtigt. Das führt in der Folge zu Annahmen einer Heizungsplanung auf DIN-basierten Angaben und zu brisanten Rechenergebnissen, was nicht verwundert, wenn unzulässige Annahmen die Voraussetzung für die Rechnung sind. Die bestenfalls abgeschätzten Angaben sind auf die historische Substanz nicht anwendbar.

7.5 Zielsetzung des Vorhabens

Im sächsischen Kloster Marienstern wird die Klosterkirche von den Schwestern ganzjährig genutzt. Am stärksten wird der Chorbereich für fünf Gebetszeiten pro Tag genutzt. Die Nutzung des Kirchenschiffes in Abhängigkeit vom Wochentag schwankt zwischen geringfügiger und intensiver Nutzung. Der Kircheninnenraum hat eine Länge von 43,5 m, eine Breite von 18,5 m und ist 18,5 m hoch und gliedert sich in unterschiedliche Nutzungszonen. Der Kirchenraum wird momentan über eine Warmwasserheizung mit Heizkörpern auf eine Mindesttemperatur von 12°C erwärmt. Zusätzlich sind im Altarraum im Chorgestühl, also im Aufenthaltsbereich der Schwestern, und zwischen den Altären Heizschleifen zur lokalen Erhöhung der Temperatur auf ca. 15°C angebracht. Mit dieser Grundtemperierung wird einer Auskühlung der massiven Bauteile wie Pfeiler und Wänden entgegengewirkt. Die Wandoberflächen bleiben vergleichsweise warm. Somit ist die Gefahr der Frühjahrscondensation, also der Tauwasserbildung an kalten Oberflächen durch Einströmen von warmer Luft mit einem hohen Feuchteanteil, eher gering. Ein nicht unerheblicher Nachteil des momentanen Zustandes sind die Heizkosten. Die Kirchenfenster mit einer Einscheibenverglasung und die ungedämmte Gewölbedecke bilden Kältebrücken, an denen es bei intensiver Nutzung im Winter beispielsweise zur Adventszeit zur Tauwasserbildung kommt. Infolge der Kältebrücken kommt es vermutlich auch zur Entstehung von Luftzirkulationswalzen und zu somit Zuglufterscheinungen, die von den Nutzern negativ wahrgenommen wird. Oberhalb der Heizkörper ist eine massive Verschwärzung der Wandoberflächen und der Ausstattung zu beobachten. Nach Einschätzung des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen sind einzelne Ausstattungsstücke gefährdet.

Im Rahmen eines DBU-Projektes soll modellhaft ein alternatives Heizungskonzept entwickelt werden. Die meist lokal begrenzten Erfahrungen zu Kirchenheizungen sollen durch die Bildung einer internationalen Expertenrunde (Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, FH Potsdam, FH Zittau, EURAC Bozen, ...) zusammengeführt und genutzt werden. Insbesondere scheinen die Ergebnisse des EU-Projektes „Friendly Heating“ für eine Anwendung in Marienstern sehr gut geeignet. Das EU-Projekt war ausgerichtet für Kirchen im alpinen Raum mit einer semikontinuierlichen Nutzung und starken bis extremen äußerlichen Witterungsbedingungen im Winter. Hauptschwerpunkte waren die Klimaschwankungen zum Schutz der Ausstattung zu minimieren und gleichzeitig eine Energieeinsparung zu erreichen, da in diesen Regionen die Energieversorgung ohnehin schwierig ist.

Ziel des Projektes ist ein Heizungskonzept zu entwickeln, das sowohl für Nutzer und Ausstattung der Klosterkirche optimale Bedingungen bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauches gewährleistet. Ein solches Konzept kann richtungweisend wirken für viele andere großvolumige historische Innenräume, die unter Berücksichtigung knapper werdender Ressourcen für Energie und geänderter Nutzung bestmöglich erhalten werden müssen. Die Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf ähnliche Fragestellungen, die wie gezeigt in Zukunft häufiger kommen werden, ist grundsätzlich gewährleistet.

Ein möglicher Zielansatz wurde mit dem abgeschlossenen EU-Projekt "Friendly Heating: both comfortable for people and compatible with conservation of art works preserved in churches Contract No : EVK4-CT-2001-00067, 01/04/2002 - 31/03/2005" (<http://www.isac.cnr.it/friendly-heating/>) gelegt: Zitat: "Instead of heating the entire room, the walls and ceiling, the heat will be concentrated just on the area where people stay without causing a negative impact on artworks. In addition, the proposed solution saves energy and as a consequence, it protects the environment." Der Lösungsansatz in diesem Projekt war die erhebliche Modifikation der traditionellen Bankheizung, um die bekannten Negativerscheinungen des Systems zu vermeiden und den bestmöglichen Einsatz zu gewährleisten.

Im Projekt an der Klosterkirche Marienstern sind der aktuelle Zustand der klimatischen Situation in der Kirche zu erfassen und die Auswirkungen festzustellen. Ein Katalog, der die Vorteile den Nachteilen gegenüberstellt ist aufzustellen. Dieser Katalog soll weit über die grundsätzlichen Tatsachen, die Anstoß zum Projekt gegeben haben hinaus reichen. Beispielweise sind als Nachteile des aktuellen Systems vier wichtige Punkte zu nennen: 1. das ständig laufende Warmwassersystem mit schwerfälliger Ansprache verursacht hohe Kosten. 2. Die Klosterschwester als Hauptnutzer klagen über häufig auftretenden starken Luftzug, der nachweisbar ist. 3. Die derzeitigen Heizkörper sind von ihrer Bauart nicht als kircheninnenraumgerecht zu bezeichnen, einzig die Beheizung im Fußboden des Chorgestühls ist unauffällig, ebenso die Fußbodenschleife im Altarraum. Es kommt zu einer intensiven Verschwärzung durch Verschmutzungsfahnen oberhalb einiger Heizkörper sowie im Gewölbe. Obwohl vor weniger als 10 Jahre der Innenanstrich erneuert wurde sind an allen Wänden und im Gewölbe intensive Verschmutzungen zu beobachten. 4. Die Ausstattung ist in der momentanen Situation nach Einschätzung des Landesamtes für Denkmalpflege gefährdet.

In einem ersten Schritt ist eine Temperierungsdefinition für die verschiedenen Bereiche der Klosterkirche und ein nutzungsorientiertes Heizungskonzept zu erstellen. Anlagen, die konsequent auf Lokalität und Tempus der Nutzung ausgerichtet sind, müssen auf ihre Effektivität im Bezug auf Energie, Erhaltung und Behaglichkeit geprüft werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass solche Konzepte möglicherweise die Senkung der Grundtemperierung als direkten Effekt der Energieeinsparung zur Konsequenz haben können. Hier sind die möglichen Folgen z.B. Kondensation und stärkere Temperaturdifferenz an den Übergängen der Nutzungsbereiche zu simulieren und möglichst zu vermeiden. Als weitere Ansätze zur Energieeinsparung sind die Energieverluste an den Fensterflächen abzuschätzen und Minimierungsmöglichkeiten zu diskutieren. Ebenso sind die Wärmeverluste am Gewölbe, der mögliche Zusammenhang mit Kondensation und Schmutzbildung am Gewölbe und Effekte einer Wärmedämmung der Gewölbekappen zu untersuchen.

7.6 Innovativer Charakter des Projektes

Für historische Monumentalbauten sind bisher keine nachhaltigen Lösungswege zum Energieeinsatz, der für die Beheizung notwendig ist, bekannt. Die meisten durchaus vielversprechenden Forschungsarbeiten der vergangenen Jahre zielen im Ansatz auf optimierte Energie-"herstellung" einerseits oder Verringerung des Energieverlustes durch die Bausubstanz andererseits. Der vorliegende Forschungsansatz zieht hingegen das Nutzerverhalten und die Nutzungszeiträume ins Zentrum der Regelung. Ungenutzte Zeiträume, die im Vergleich auch bei guter Auslastung des Gebäudes, immer noch den größten Anteil haben, sollten möglichst keinen Energieverbrauch verursachen. Dafür muss dann der Nutzungszeitraum optimal beheizt werden können, darf also nur geringste Vorlaufzeiten beanspruchen und der Raum muss so begrenzt wie möglich gehalten werden. Die Umsetzung eines solchen Konzeptes in der Klosterkirche ist theoretisch sehr gut möglich, da erstens die Nutzungszeiträume gut definiert, die Nutzungsräume ebenfalls gut definiert und eng begrenzt sind und sich die Besucher innerhalb dieser Räume nur wenig bewegen.

Im Bezug auf Baumaterialien und konstruktiven Eingriffen sind in den vergangenen Jahren im modernen Bauen und in der Altbausanierung von Wohnhäusern große Fortschritte erzielt worden. Ziel dieser Forschungen war oftmals die Optimierung der Bauhülle, um wenig Energie an die Umgebung zu 'verlieren'. Diese hervorragenden Ergebnisse sind auf historische Monumentalbauten leider wegen des Zielansatzes nicht übertragbar. An den denkmalgeschützten Gebäuden mit Maueraufbauten, die nicht normgerecht übertragbar sind, kann beispielsweise aus denkmalenschutzrechtlichen aber auch technischen Gründen nicht vollflächig eine Dämmung angebracht werden. Ebenso ist die Veränderung der Fenster hoch problematisch. Daher muss der Energieeintrag bestmöglich auf die Nutzung angepasst und ausgenutzt werden.

8 Historische Warmhaltestrategien

Dieses Kapitel wurde von Herrn A. Dubslaff, Volontär am Landesamt für Denkmalpflege, recherchiert und verfasst.

„ez was ouch in der zît wol, daz man wirme haben schol“

(aus: Jansen Enikels Weltchronik. Fürstenbuch, MGH. SS. Dt. Chron. 3, S. 617, Z. 977 f.)

Die folgenden Ausführungen erörtern die Frage, wie sich die Menschen in den zurückliegenden Jahrhunderten im Kirchenraum vor Kälte und Zugluft schützten. Anders als Heutzutage, da viele sakrale Räume durch den Einbau von Heizungen eine variable Temperierung ermöglichen, musste der Gläubige in der Vergangenheit andere, zum Teil individuelle Wege finden, um den niedrigen Temperaturen in der Kirche entgegenzuwirken.

Die anschließenden Überlegungen beziehen sich auf Bild- und Schriftquellen, die technische Komponente tritt dabei zwangsläufig in den Hintergrund. Nicht nur der Kirchenraum – also Langhaus und Chor – sondern auch die zugehörigen Gebäude werden in die Betrachtung mit einbezogen. Abgesehen von einigen kurzen Ausblicken bilden das Mittelalter und der Beginn der Frühen Neuzeit den zeitlichen Rahmen.

Die Existenz von Heizungen in Klöstern kann seit dem Frühmittelalter nachgewiesen werden. Diese dienten jedoch in keinem Fall der Erwärmung des Kirchenraums. Einzige Ausnahme und zugleich einen interessanten Sonderfall stellt die um 370 erbaute Basilika im oberösterreichischen Enns dar. Hier waren das Kirchenschiff und die Apsis über Unterbodenkanäle beheizbar. Der Grund, dass dieses Prinzip keine Nachfolge fand, liegt darin begründet, dass man die Heizung eines römischen Tempels benutzte auf dessen Fundament die Basilika erbaut wurde.¹ Meist stellte das Calefactorium – neben der Küche – den einzigen beheizbaren Ort innerhalb des Klosters dar. Dieser Raum diente dem Zweck des Aufwärmens der Ordensmitglieder. Nach den Ordensregeln der Zisterzienser konnten hier auch medizinische und hygienische Belange befriedigt werden, daneben fanden weitere Arbeiten statt, die eine warme Umgebung voraussetzten, wie etwa das Trocknen des Pergaments oder das Mischen der Tinte.² Im europäischen Raum beläuft sich die Anzahl der nachweisbaren Warmluftheizungen in Klöstern auf ca. 90 Objekte und die Zahl steigt durch neue Befunde ständig an.³ Weiterhin verfügten einige Hospitäler und Bischofssitze über diesen Heizungstyp.

Neben den Warmluftheizungen, die auf die römische Hypokaustenheizung zurückgehen fanden auch Kamine zur Beheizung der verschiedenen Klosterräume Verwendung.⁴

Wenn die begrenzte Anzahl der beheizbaren Räume im Kloster auf den ersten Blick dem Gedanken der Askese und der damit verbundenen Vermeidung von Luxus entgegen kommt, so zeichnet der St. Gallener Klosterplan ein relativierendes Bild.⁵ Dieser zu Beginn des 9. Jahrhunderts in der Benediktinerabtei St. Gallen entstandene „Idealplan“ benennt die Funktionen und Ausstattung der einzelnen Gebäude einer Abtei näher.

So verfügt das Gästehaus über einen *locus foci* (Herdstelle) sowie über zwei *caminatae cum lectis* (mit einem Kamin ausgestattete Schlafzimmer). Selbstverständlich besaß auch die Küche eine Feuerstatt in Form eines *fornax super arcus* (Herd über Bogen bzw. Bögen). Die äußere Schule war wohl mit einem Feuerbecken ausgestattet, also einer transportablen bzw. mobilen Wärmequelle. Die für die Novizen vorgesehenen Räume im Bereich des Kreuzgangs besaßen ebenfalls einen Wärmeraum. Dieser wurde von einem Kamin mit entsprechendem Rauchabzug beheizt (*pisalis / exitus fumi / caminus*). Über die gleiche heiztechnische Ausstattung verfügte der Komplex, der Dormitorium, Wäscherei und Sanitäranlagen der Mönche beinhaltete. Hier wird explizit ausgeführt, dass sich der Schlafsaal über dem Wärmeraum befinden soll (*subtus calefactoria domus / supra dormitorium*). Man kann davon ausgehen, dass es sich hierbei um eine ganz bewusste Entscheidung handelte, um die Wärme so gut wie möglich zu nutzen, wie auch die Lage des Dormitoriums in Muri im Aargau *subtus autem pisalis* beweist.⁶

Cluniazenser und Zisterzienser zogen es in der Regel vor, das Calefactorium an das Refektorium angrenzen zu lassen und vereinzelt auch die Abluft zum Heizen weiterer Räume zu verwenden. Als Speicher nutzten diese Warmluftheizungen das Mauerwerk, in späterer Zeit fanden Findlinge als zusätzliche Speichermedien Verwendung.⁷

Es kann als sicher gelten, dass die Mehrzahl der Klöster im Mittelalter über eine Heizanlage verfügte.⁸ Neben den bereits erwähnten Orden der Zisterzienser und Benediktiner nutzten auch

die Klöster der Dominikaner (z.B. in Bern) und Franziskaner (z. B. in Bautzen und Ulm) – der großen Bettelorden also – diese Heizungsanlagen.⁹

Die direkte Beheizung des Refektoriums, des sog. Winterrefektoriums nahm dem Calefactorium seine Funktion, so dass es im 16. Jahrhundert schließlich immer stärker an Bedeutung verlor und schließlich verschwand.¹⁰

Abschließend sollen noch einige Nennungen des Calefactoriums in den Schriftquellen, besonders des Hohen Mittelalters genannt werden. So wird beispielsweise in der Lebensbeschreibung des Abtes Rudolf von St. Trond (um 1070-1138) ein *hyemale calefactorium*¹¹ erwähnt. Der „Ordo Frafenses“ des Odilio benennt die Maße eines cluniazensischen Calefactoriums: *Calefactorium 25 pedes latitudinis, longitudinis eademque mensuram*.¹² Und der Benediktiner Hermann von Niederaltaich berichtet für das Jahre 1260 folgendes: *constructum est pisale fratrum*.¹³

Nur erwähnt werden soll an dieser Stelle der Einsatz verschiedener anderer mobiler Wärmequellen, auch wenn diese nicht mehr in jedem Fall explizit nachweisbar sind. Die Rede ist von Kohle- oder Glutbecken sowie von mobilen Öfen, die jedoch scheinbar erst im Spätmittelalter Verwendung fanden.

Vor und nach der Liturgie im Kirchenraum boten also teilweise mehrere Räume im Klosterkomplex den Ordensmitgliedern die Möglichkeit sich aufzuwärmen. Doch auch die Zeiten während der liturgischen Handlungen setzten schon durch ihre Dauer ein Mindestmaß an Behaglichkeit voraus. Dieser Begriff soll nicht falsch verstanden werden, er meint in diesem Zusammenhang lediglich eine erträgliche Temperatur und Schutz vor Zugluft und Feuchtigkeit. Dieser Schutz diente letztendlich nicht nur der Gesundheit der Gläubigen, er war auch notwendig um die Messe in angebrachter Weise zu vollziehen.

Die Vorkehrungen des einzelnen Individuums zur Abwehr von Kälte beginnen bei seiner Kleidung. Im Jahr 1335 benötigten die Weißenauer Prämonstratenser für ihren – im Idealfall 100 Personen umfassenden – Konvent 60 Kuhhäute, 400 Schaffelle und 700 Ellen Stoff. Dies stellte keineswegs einen Sonderfall dar, sondern war wohl eine übliche Menge, da der Text von den „*necessaria camere, sicut antiquitus, cum totus conventus esset in domo*“ spricht.¹⁴ Man wird also davon ausgehen können, dass ein Teil dieser Produkte, wie etwa die Schaffelle während des Aufenthaltes in der Kirche Verwendung fanden.

Ein gänzlich anderes Mittel um sich zu wärmen stellten die so genannten Wärmekugeln oder Wärmeäpfel dar. Diese fanden in gleicher Weise bei Laien wie auch beim Klerus seit dem Hochmittelalter Verwendung. Bekanntestes Beispiel einer Wärmekugel findet sich in dem Skizzenbuch des Villard de Honnecourt von ca. 1235 (Abb. 3).¹⁵ Bereits im 8. Jahrhundert tauchen diese Objekte in den Quellen auf.¹⁶ Hier werden sie einheitlich als *pomum* bezeichnet, ein Terminus, welcher der Form der Wärmeäpfel geschuldet ist. Von den erhaltenen Wärmekugeln des Hohen Mittelalters sei an dieser Stelle auf das Exemplar aus dem Musée de Cluny verwiesen (Abb. 4). Es entstand im späten 12. Jahrhundert und stammt aus dem Maasgebiet.¹⁷ Die Darstellungen der *artes*, die jenen Wärmeapfel zieren, verweisen auf einen Besitzer, der einem intellektuellen Milieu entstammte, so dass das Objekt zu dieser Zeit sicherlich im Besitz eines Geistlichen war. Dass der Gebrauch einer Wärmekugel durchaus auch kritisch betrachtet wurde, lässt eine Abbildung in einer Handschrift aus dem Kloster Heiligenkreuz in Niederösterreich erkennen (Abb. 5).¹⁸ Das Glücksrad des schlechten Mönches zeigt einen Abt auf einem Faldistorium, der in seiner Rechten den Abtsstab, in seiner Linken hingegen eine Wärmekugel hält. Er steht in dieser Darstellung für die Sünde der Hoffart. Die Abbildung eines solchen Gegenstandes verdeutlicht, dass es sich dabei um ein, wenn auch im monastischen Umfeld nicht unbedingt gern gesehenes, so doch allgemein bekanntes Objekt handelte. Es wird vermutet, dass die Wärmekugeln ursprünglich auf dem Altar lagen und dem Liturgen halfen, weder die Hostie fallen zu lassen noch den Messwein zu verschütten.¹⁹ Noch im 19. Jahrhundert heißt es im Deutschen Wörterbuch von Jacob und Wilhelm Grimm: „*Wärmepfel, m. metallkugel zum erwärmen der hände, besonders von geistlichen gebraucht*“²⁰. Zu dieser Zeit hatte der Wärmepfel bereits an Bedeutung verloren. Eine Variante dazu stellt der Wärmstein dar, ein meist oblonger Stein der im Gegensatz zum Wärmepfel nur als Wärmespeicher fungiert.²¹ Gemeinsam ist beiden die nur geringe Wärmeabgabe.

Das lange Stehen beziehungsweise das Sitzen während der Liturgie, ließ Maßnahmen notwendig erscheinen, die dem Schutz vor Zugluft aber auch vor Feuchtigkeit dienten. In den wenigsten Fällen haben sich die hierzu verwendeten Realien in Form von Textilien erhalten, wohl auch weil sie schlichte Gebrauchsgegenstände darstellten, die durch ihre ununterbrochene Nutzung relativ schnell verschlissen. Dabei sind – und dieser Umstand muss betont werden – nicht jene Textilien gemeint, die ausschließlich zum Schmuck der Kirche an hohen Festtagen zumeist den Chorraum schmückten.

Dem so genannten „Heidnischwerk“ aus dem Gebiet des Oberrheins kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da sich zahlreiche dieser Wirkarbeiten erhalten haben.²² Die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten der dicken und relativ steifen Textilien schließen auch den sakralen Bereich mit ein. Hier fanden sie als Antependium aber auch als Kissenbezüge sowie als Rücklaken Verwendung, sie hingen also an der Wand beziehungsweise an den Pfeilern oder an einer hochlehnigen Bank und schützten so vor Kälte, Zugluft und Feuchtigkeit. Das „Heidnischwerk“ war besonders im 15. und 16. Jahrhundert in Gebrauch.

Ebenso verbreitet, wenn auch kaum erhalten und bisher wenig beachtet sind die übrigen Textilien, die die gleiche Funktion erfüllten wie das „Heidnischwerk“. Zumeist sind sie nur über Bildquellen aus dem Bereich der Buchmalerei nachweisbar, dort jedoch in verblüffend großer Zahl.²³ Im Folgenden sollen nur einige Beispiele genannt werden.

Das im zweiten Viertel des 15. Jahrhunderts in Frankreich entstandene Stundenbuch der Maria Stuart zeigt auf Blatt 110 recto ein Totenoffizium (Abb. 6).²⁴ Im Hintergrund an den Mauern erscheint ein langer textiler Stoffbehang der an Haken befestigt ist. Gleiches wiederholt sich im Bereich des Chores auf Blatt 167 verso (Abb. 7).²⁵ Hier ist der Behang auf einer Stange angebracht. Ein ähnlicher Vorhang erscheint – wenn auch stärker schematisiert – auf der Titelm miniature zur *Summa Theologiae* des Thomas von Aquin (Abb. 8).²⁶

Den Schutz vor Zugluft durch solch einen Behang zeigt eine Miniatur aus dem Stundenbuch des Simon des Varie (Abb. 9). Ein im unteren Bereich der Fenster angebrachter Behang zieht sich über deren gesamte Breite.²⁷

Eine individuellere Schutzfunktion kann man an Betpulten –bänken und –stühlen beobachten. Die Stoffbespannung taucht hier im Bereich der Lehne als Rücklaken auf, sie kann jedoch auch bei einem Pult ohne Lehne hinter dem Betenden aufgehängt werden und so gleichzeitig einen Baldachin bilden. Die Verwendung als Rücklaken belegt eine Verkündigungsszene aus einer österreichischen Weltchronik, während ein Tafelbild aus Kremsmünster die zweite Variante zeigt (Abb. 10, Abb. 11).²⁸

Am eindrücklichsten vermittelt wird oben gesagtes in den Darstellungen der weiblichen Angehörigen der Familie Fuchshart beim Gebet (Abb. 12). Die Betstühle sind mit Türen versehen und werden im Hintergrund von einem umlaufenden Vorhang beschirmt.²⁹

Die aufgeführten Bild- und Textbeispiele sollen helfen, den Stellenwert zu verdeutlichen, den unsere Vorfahren dem Schutz vor Kälte und anderen Umwelteinflüssen beimaßen. Die Kürze der Ausführungen ist auch dem äußerst speziellen Teilbereich – den monastischen beziehungsweise sakralen Räumen – dieses Themas geschuldet, dem bisher fast ausschließlich von der Realienkunde Beachtung geschenkt wurde. Als Ergebnis soll die Vielfalt der verschiedenen Verfahren hervorgehoben werden. In gleichem Maße verdient der Umstand Beachtung, dass diese Verfahren – ob nun die Verwendung des Wärmepfels oder der Einsatz von Vorhängen im Kirchenraum – im gleichen Zeitraum in ganz ähnlicher Weise in den meisten Klöstern und Kirchen Westeuropas zur Anwendung kam. Man kann darin die Verbreitung bestimmter Praktiken und Techniken erblicken, die sich allein durch ihre Wirksamkeit durchsetzen konnten und so über Jahrhunderte angewandt wurden.

Anmerkungen:

¹ Bingenheimer, Klaus: *Die Luftheizungen des Mittelalters. Zur Typologie und Entwicklung eines technikgeschichtlichen Phänomens*. Hamburg 1998 = *Antiquitates. Archäologische Forschungsergebnisse* Bd. 17, S. 41

² Vgl. Hecht, Konrad: *Art.: Calefactorium*. In: *Reallexikon der deutschen Kunstgeschichte*, Bd. 3, Sp. 307ff.

- ³ Wie Anm. 1, S. 200 ff.; Meyer, Diethardt: *Warmluftheizungen des Mittelalters. Befunde aus Lübeck im europäischen Vergleich*. In: *Lübecker Schriften zur Archäologie und Kulturgeschichte* 16 (1989), S. 221, 231
- ⁴ Hundsichler, H.: Art.: *Heizung*. In: *Lexikon des Mittelalters*, Bd. 4, Sp. 2114
- ⁵ *Codex Sangallensis 1092 recto*
- ⁶ Wie Anm. 2
- ⁷ Wie Anm. 3, S. 217; *Eine Sonderform dieses Heizungstyps stellte die Heizung im Kloster Altzella dar*. Vgl.: Magirius, Heinrich: *Die Baugeschichte des Klosters Altzella*, Berlin 1962 = *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, philosophisch-historische Klasse* 53, 2
- ⁸ Gerlach, Thomas und Matthias Wilhelm: *Eine Steinofen-Luftheizung im ehemaligen Franziskanerkloster Bautzen*. In: *Ausgrabungen und Funde* 37 (1992), S. 61
- ⁹ Wie Anm. 7; *Zu Bern vgl.: Bingenheimer, Klaus: Typologie und Wirkungsweise historischer Heizungen*. In: *Burgen und Schlösser* 48 (2007), S. 242; *zu Ulm vgl.: Bräuning und Stelze-Hüglin, Drei Heizanlagen des ehemaligen Franziskanerklosters Ulm*. In: *Mittelalterliche Öfen und Feuerungsanlagen*, Stuttgart 2002, S. 35-54 = *Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* H. 62.
- ¹⁰ Wie Anm. 1, S. 169 f.
- ¹¹ MGH. SS. 10 [*Annales et chronica aevi Salici. Vitae aevi Carolini et Saxonici*], S. 196, Z. 44.
- ¹² MGH. SS. 11 [*Historicae aevi Salici*], S.546, Z. 37.
- ¹³ MGH. SS. 17 [*Annales aevi Suevici*]
- ¹⁴ *Zit. nach: Wieland Georg, Gemeinschaft im Wandel. Der Weißenauer Konvent vom 12. bis zum 19. Jahrhundert*. In: *850 Jahre Prämonstratenserabtei Weißenau 1145-1995*, Helmut Binder (Hrsg.), Sigmaringen 1995, S. 135, *Der genaue Nachweis der Quelle wird nicht genannt, da die Anmerkungen fehlerhaft sind*.
- ¹⁵ Hahnloser, Villard de Honnecourt, Graz 18722.
- ¹⁶ Schiedlausky, Günther: *Kühlkugel und Wärmepfel*, München 1984 = *Forschungshefte Bayerisches Nationalmuseum München* 9, S. 20.
- ¹⁷ *Ausst. Kat. Die Zeit der Staufer*, Bd. I, S. 526, Nr. 707.
- ¹⁸ *Stiftsbibliothek Heiligenkreuz, Cod. 226 ; fol. 146r; Die Handschrift entstand zu Beginn des 13. Jh.*
- ¹⁹ Wie Anm.16, S.21
- ²⁰ *Zit. nach: Deutsches Wörterbuch von Jacob Grimm und Wilhelm Grimm. 16 Bde. Leipzig 1854-1960, Bd. 27, Sp. 2047.*
- ²¹ *Johann Heinrich Zedlers Grosses vollständiges Universallexicon aller Wissenschaften und Künste*, Bd. 52, 1747, Sp. 500.
- ²² Zimmermann, Eva: *Zur spätgotischen Wirkerei und Stickerei am Oberrhein*. In: *Ausst. Kat. Spätgotik am Oberrhein. Meisterwerke der Plastik und des Kunsthandwerks 1450-1530*. Karlsruhe 1970, S. 279-282, bes. S. 279.
- ²³ *Dies trifft in besonderem Maße für den sakralen Bereich zu. Die profanen Wandbehänge, des 15. und 16. Jahrhunderts aus dem höfischen Milieu – hier sei auf die burgundischen Niederlande verwiesen – waren und sind Ziel zahlreicher Untersuchungen.*
- ²⁴ *Eremitage. Lat. Q. v. I, 112; Zu den Abbildungen vgl.: Woronowa, Tamara und Andrei Sterligow: Westeuropäische illuminierte Handschriften vom 8.bis 16. Jahrhundert in der Russischen Nationalbibliothek, Sankt Petersburg. Bournemouth / Sankt Petersburg 1996, S. 121.*
- ²⁵ Wie Anm. 24, S. 122.
- ²⁶ Wie Anm. 24, S. 161.
- ²⁷ *Den Haag, Koninklijke Bibliotheek, 74 G 37a.*
- ²⁸ *Zu den Bildern vgl.: <http://www.imareal.oeaw.ac.at/realonline/>, Bild: 006309 und Bild 000205.*
- ²⁹ Wie Anm. 28, Bild 004676.



Abb. 3 Schematische Darstellung einer Wärmekugel aus dem Skizzenbuch des Villard de Honne-court (um 1235) f ol. 9v, Paris Bibliothque Nationale De France Ms Fr 19093



Abb. 4 Wärmepfapel mit der Darstellung der artes, spätes 12. Jh., Maasgebiet, Musée de Cluny, inv. Nr. 17703



Abb. 5 Glücksrads des schlechten Mönchs, Sammelhandschrift, Kloster Heiligenkreuz, Beginn des 13. Jh., fol. 146r, Stiftsbibliothek Heiligenkreuz, Cod. 226

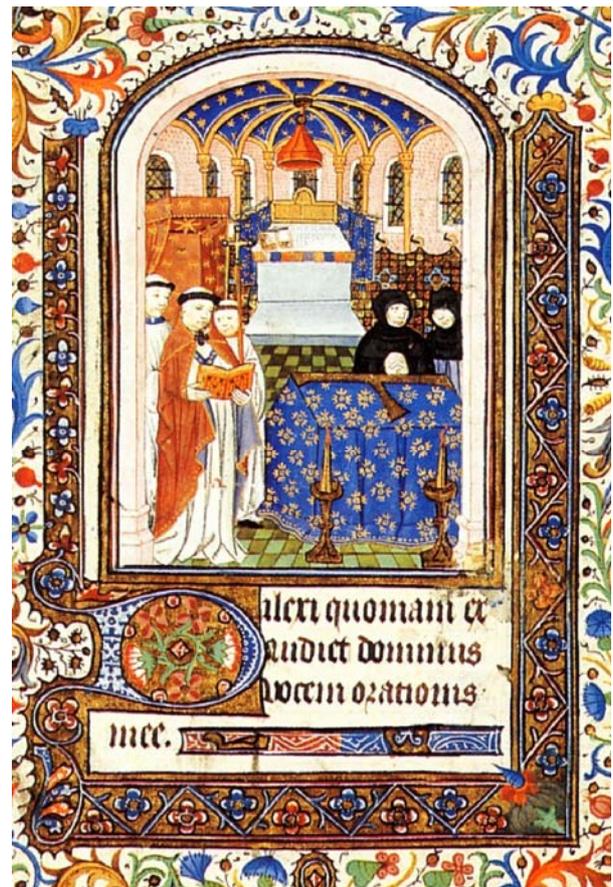


Abb. 6 Totenoffizium, Miniatur aus dem Stundenbuch der Maria Stuart, Frankreich, 2. V. 15. Jh., fol. 110r, Eremitage. Lat. Q. v. I, 112



Abb. 7 Der Heilige Franziskus, Miniatur aus dem Stundenbuch der Maria Stuart, Frankreich, 2. V. 15. Jh., f ol. 167v, Eremitage. Lat. Q. v. I, 112



Abb. 8 Thomas von Aquin von Schülern umgeben, Miniatur aus der Summa Theologiae



Abb. 9 Kalenderminiatur aus dem Stundenbuch des Simon de Varie, Frankreich, Mitte 15. Jh., Den Haag, Koninklijke Bibliotheek, 74 G 37a.



Abb. 10 Verkündigung, Minatur aus einer Weltchronik, Österreich, 3. V.15. Jh., fol. 232v, Österreichische Nationalbibliothek ; cod. 2766



Abb. 11 Verkündigung, Tafelmalerei, Oberösterreich
um 1500, Stiftsgalerie Kremsmünster

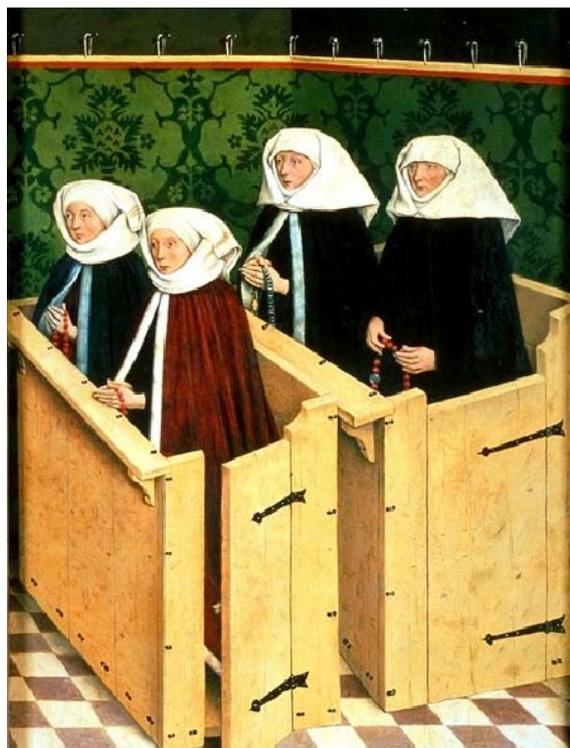


Abb. 12 Mitglieder der Familie Fuchshart beim Gebet,
Ausschnitt aus einem Flügelaltar von Herlein
Friedrich, 1462, Nördlingen, Stadtmuseum

Sr. Thaddäa konnte die Recherche nach historischen Wärmestrategien im Kloster erweitern. Natürlich kamen auch im Kloster viele der sonst im Weltlichen üblichen Techniken der jeweiligen Zeit zum Einsatz. Dazu zählen Messing-Wärmeflaschen und auch erwärmte Ziegelsteine, die nah am Körper platziert oder ins Bett geschoben wurden. Es gab Kissen und Decken zum Umwickeln. Im Barock gab es dann schon heizbare Zellen. Jede Schwester bekam eine Ration an Holz / Kohle, die gut eingeteilt werden musste. Es gab Türchen am Bankende des Gestühls. Eine solche Bank ist auch noch im Kloster vorhanden, auch auf einer älteren Aufnahme ist eine solche Bank gut zu sehen. Ein Foto eines "Betstübchens" ist im Buch "Zum Lob und Ruhme Gottes" abgedruckt. Das Betstübchen war nichts für das offizielle Gebet, aber für das private konnte man es sich in einem solchen Stübchen schon warm "machen". Möglicherweise war man früher vielleicht auch nicht ganz so kälteempfindlich wie heute: über lange Jahrhunderte gab es im Kloster nur eine Wärmestube, um sich aufzuwärmen. Der Rest des Klosters war idR nicht geheizt. Die Fotos zeigen verschiedene Kleidungsstücke, die im Kloster St. Marienstern lange benutzt wurden. In Abb. 13 ist ein Mantel mit Pelzfutter dargestellt. Den trugen die Priester im Beichtstuhl oder die Schwestern unter der Kukulie. Abb. 14 zeigt eine Wanddecke. Mit dem Stoff wurden Rückwände etc. verkleidet. Die Schlaufen wurden an entsprechenden Haken festgemacht. In den Pelzfußsack Abb. 15 steckte man die Füße, die waren dann ziemlich warm. Der Pelzfußsack wirkt wie ein Wärmeschuh. Der andere Pelzfußsack mit schwarzem, weichem Futter (Abb. 16) ist etwas höher und reichte bis zu den Knien. Diese waren für die Beichtväter gedacht, die mehrere Stunden im Beichtstuhl saßen und nicht frieren sollten.



Abb. 13 Mantel mit Pelzfutter



Abb. 14 Wanddecke



Abb. 15 Pelzfußsack



Abb. 16 Pelzfußsack

9 Schadensaufnahme

9.1 Geschichte der Innenraumfassungen

Die Zisterzienserinnenabtei St. Marienstern in Panschwitz-Kuckau gehört zu den wenigen Klöstern, die seit ihrer Gründung Mitte des 13. Jahrhunderts ununterbrochen bestehen (Bauer 1998). Von wenigen Ausnahmen in der Geschichte abgesehen, ist die Klosterkirche seit ihrer Fertigstellung gegen Ende des 13. Jahrhunderts als Ort des täglichen Gebetes kontinuierlich genutzt. Alle Veränderungen beziehungsweise Arbeiten an der Raumschale sind archivalisch dokumentiert (Winzler 2008) und konnten bei der Befunduntersuchung 1965 bestätigt werden (Riedel 1965). Die erste Raumfassung der Klosterkirche, die im Rahmen einer umfassenden Restaurierung 1965 bis 1968 wieder hergestellt wurde, war materialbetont. Zu den weißen Flächen von Wänden und Gewölbekappen standen rote Backsteingliederungen mit weißem Fugenstrich sowohl an den Gewölberippen als auch an den Pfeilern. Die dazwischen liegenden Granitwerksteine waren steinfarbig gefasst. Über ein Jahrhundert nach der Errichtung erfolgte um 1429 die erste Reparatur, die im Wesentlichen diese erste Raumfassung wiederholte. Nach weiteren einhundertfünfzig Jahren – um 1585 – ist eine Renovierung belegt: schmucklose weiße Flächen vermutlich mit didaktischen Inschriften. Diese wich gegen Ende des 17. Jahrhunderts einer aufwändigen farbigen Fassung. Als man 1835 der Buntheit überdrüssig wurde, erfolgte eine schlichte, monochrom weiße Teilfassung der Wände, die 1862 von einem anspruchsvollen Ausmalungsprogramm abgelöst wurde. Etwa um diese Zeit erhielt die Klosterkirche erstmals eine Heizung. Nach nur 30 Jahren war eine Neuausmalung erforderlich, die die vorhandene Ausmalung wiederholte. Vierzig Jahre später, 1932, musste das verrußte Innere der Kirche wiederum neu gestrichen werden. Die Fotos vor der umfassenden Restaurierung 1965–68 zeigen deutliche Schmutzfahnen an den Wänden über den Heizungen (Abb. 18, Abb. 19). Nachdem sich bereits nach wenigen Jahren erneut erste Schmutzfahnen abzeichneten, wurden Ende der 1990er Jahre die Wände in Vorbereitung auf die 1. Sächsische Landesausstellung neu geweißt. Nur zehn Jahre später waren die Wände wieder verschmutzt. Besonders starke Staubschichten hafteten auf den Gewölbeflächen, die die eigentliche Farbigkeit des hellen Gewölbes völlig verfälschten.

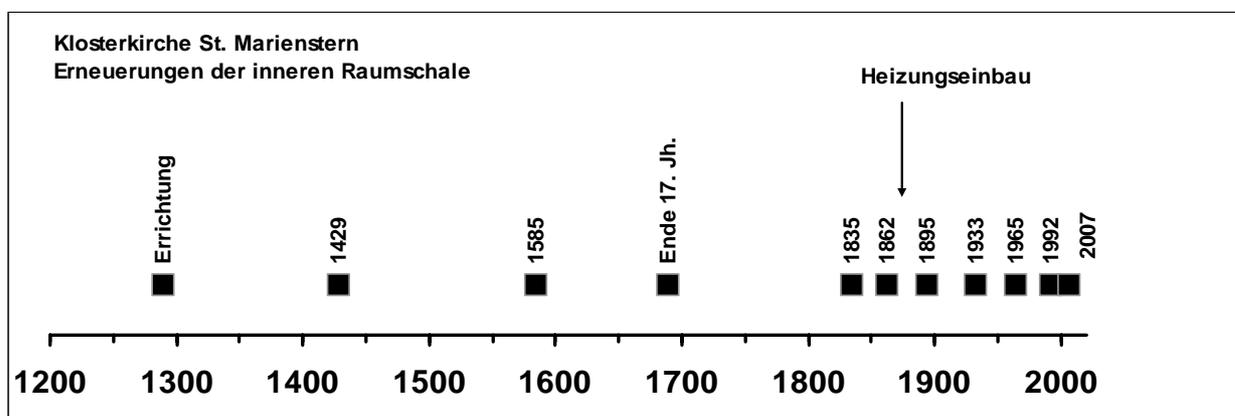


Abb. 17 Fassungserneuerungen auf einer Zeitachse aufgetragen

Der Abriss zur Geschichte der Raumfassungen der Klosterkirche offenbart, dass bis zum erstmaligen Einbau einer Heizungsanlage entweder durchgeführte Reparaturmaßnahmen oder ein gewandelter Zeitgeschmack die entscheidenden Gründe für eine neue Ausmalung waren. Dazwischen liegt in der Regel ein zeitlicher Abstand von über einem Jahrhundert. Mit dem Einbau und Betrieb der Heizung verkürzten sich die Intervalle der Instandsetzungen, die nun wegen des hohen Verschmutzungsgrades notwendig werden, auf wenige Jahrzehnte. Diese Entwicklung wird im Diagramm von Abb. 17 exemplarisch dargestellt. In der Klosterkirche befinden sich zahlreiche, wertvolle Ausstattungstücke aus verschiedenen Jahrhunderten. Die Materialvielfalt reicht dabei von farbig gefassten Schnitzaltären, über Leinwandgemälde bis zu den Stiftergrabplatten in Materialkombinationen aus Stein und Metall, die alle unterschiedlich empfindlich auf raumklimatische Schwankungen reagieren. Bei der Zustandsuntersuchung konnte festgestellt

werden, dass fast alle Ausstattungstücke die raumklimatischen Bedingungen des Heizungsregimes relativ unbeschadet überstanden haben. Eine Ausnahme hierbei bilden die Schnitzfiguren auf der Chorgasse, wobei sich die Schadensursachen hier nicht eindeutig bestimmen lassen. Auch Sonneneinstrahlung könnte hier die Schäden mit verursachen. Insgesamt kann den leicht erreichbaren Ausstattungsstücken ein guter Pflegezustand attestiert werden. Bei den schwieriger zugänglichen Objekten ist der Verschmutzungsgrad konservatorisch durchaus bedenklich, da die Staubauflagen bei erhöhter Luftfeuchtigkeit als Nährboden für mikrobiologischen Befall wirken können. Aus restauratorisch-konservatorischer Sicht können demnach die raumklimatischen Verhältnisse im Blick auf die die relative Luftfeuchte erhalten bleiben. Aber es müssen Möglichkeiten gefunden werden, die Verschmutzungen an Wand- beziehungsweise Gewölbeflächen und die Staubablagerungen auf der Ausstattung deutlich zu verringern.

9.2 Klimabedingte Schäden an der Ausstattung

Die Klosterkirche St. Marienstern beherbergt zahlreiche Ausstattungstücke aus verschiedenen Jahrhunderten. Von den drei Flügelaltären ist der Vierzehn-Nothelfer-Altar aus der 2. Hälfte des 15. Jh. ist der älteste, der Magdalenenaltar entstand um 1520 und der Annenaltar um 1670. Der barocke Hochaltar aus Marmor über einem gemauerten Kern, wurde zwischen 1754 und 1756 von Prager Künstlern geschaffen. Dazu gehört neben den überlebensgroßen vergoldeten Holzsulpturen, auch umfangreicher geschnitzter vergoldeter Zierrat und ein großformatiges Leinwandbild.

Vom ehemaligen Hochaltar (aus dem 17. Jahrhundert) haben sich noch zwei Einzelfiguren erhalten, die im Kirchraum Aufstellung gefunden haben.

Außerdem befinden sich in der Klosterkirche noch 8 aufwändig gestaltete Epitaphien aus Stein bzw. Stuck aus dem 17. bis 19. Jahrhundert sowie 15 Ölgemälde der Kreuzwegstationen aus dem 19. Jahrhundert.

Auf der Trennwand zum Südseitenschiff stehen 12 überlebensgroße barocke Schnitzfiguren.

Weiterhin hat sich das historische Chorgestühl aus dem 17. Jahrhundert mit gemalten Heiligendarstellungen auf den Dorsalen auf dem Nonnenchor erhalten

Für Kirchenbesucher nicht sichtbar, in dem zur Klausur gehörenden Bereich der Chorgasse, befinden sich weitere, hauptsächlich mittelalterliche Einzelfiguren, die wertvollste ist eine fast lebensgroße Pieta aus dem 13. Jahrhundert.

Während die kleinen Flügelaltäre, die gut erreichbar sind und deshalb regelmäßig gepflegt und gereinigt wurden, sich im Wesentlichen in einem guten Erhaltungszustand befinden, hatten besonders die großen Schnitzfiguren auf der Chorgasse, die um 1970 nach Befund neu gefasst worden sind, starke, möglicherweise klimatisch bedingte Schäden. Deren massive Schnitzblöcke, die aus mehreren Stücken verleimt sind, zeigten bereits kurze Zeit nach der Aufstellung in der Kirche wieder erste Risse. Außerdem gab es teilweise sehr starke Fassungsschäden und das während der Reinigung beobachtete Phänomen durch Fassung ausgetretener (Festigungs?)-Substanzen wurde wahrscheinlich auch durch das Raumklima provoziert. Durch zu trockene Raumluftzustände und Sonneneinstrahlung kann ein Austrocknen des Holzes und ein damit verbundenes Schrumpfen und Reißen provoziert werden.

Der partielle Schimmelbefall auf einzelnen Skulpturen kann sowohl technologisch (anfällige Restaurierungsmaterialien) als auch klimatisch bedingt sein.

Insgesamt haben Art und Betrieb der Heizung zu einem hohen Verschmutzungsgrad von Wandflächen und Ausstattung geführt. Diese teilweise sehr dicken Staubauflagen, die bei erhöhter Luftfeuchte zusammenbacken können, bilden gute Nährböden für Schimmelbefall und sind dann kaum ohne Schäden zu verursachen von Oberfläche entfernbar. Die extreme Verschmutzung der Gewölbekappen wird wahrscheinlich durch das Temperaturgefälle zwischen Dachraum und Innenraum auch begünstigt.

9.3 Verschwärzungserscheinungen an den Wänden und im Gewölbe

An den in weiß gehaltenen Innenwänden der Klosterkirche und am Deckengewölbe ist eine teilweise sehr intensive Verschwärzung zu sehen. Diese machte eine Reinigung der gesamten Oberflächen nötig. Der letzte Anstrich der Kircheninnenwände erfolgt etwa 1997/8 vor der

Sächsischen Landesausstellung in Marienstern. Das entspricht einer Standzeit von weniger als 10 Jahren. Für einen Pflegezyklus ist dieser Zeitraum viel zu kurz.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich nicht um ein Problem nach 1997 handelt, sondern schon vorher aktiv war. Abbildungen aus dem Bildarchiv des Landesamtes für Denkmalpflege zeigen auch 1965 eine deutliche Verschmutzung der Wände (Abb. 18, Abb. 19). Bei der Innenrestaurierung der Klosterkirche 1966-1967 wurden Teile des Putzes erneuert und die Wände geweißt. Winzeler (2008) geht mehrfach auf Restaurierungsarbeiten im Innenraum, die aufgrund von intensiver Verschmutzung notwendig geworden waren ein. So beschreibt er eine Ausmalung als anspruchsvolle Neufassung in den Jahren 1860-1861. Dann „Starke Feuchtigkeitsschäden und die Auswirkung der neuen Heizung machten bereits dreißig Jahre später eine komplett Erneuerung nötig. 1891-1892 wurde die ältere Fassung vollständig übermalt, wobei man sich inhaltlich und motivisch an das Vorhandene anlehnte.“ (Winzeler 2008). Daraus folgen zwei wichtige Zusammenhänge: Erstens hatte diese Fassung eine Standzeit von 30 Jahren bis die u.a. durch Auswirkungen einer Heizung erneuert werden musste. Zweitens gab es eine Heizung in der Klosterkirche vor 1891.

Die Fassung von 1891-1892 hat 40 Jahre Bestand bis 1933. Bei den dann erfolgten Restaurierungsarbeiten wird auch eine neue Heizung eingebaut.



Abb. 18 Blick in die Klosterkirche, 1965, die Ausschnittvergrößerungen zeigen deutlich die Schmutzfahnen an den Wänden



Abb. 19 Schmutzfahnen an der Südwand, 1965

Wie die neuen Abbildungen von 2007 belegen, treten die Verschwärzungen besonders intensiv im Bereich der Heizkörper und Heizleitungen auf. Abb. 20 zeigt eine nach oben zunehmende intensive Verschmutzung etwas oberhalb des Heizkörpers beginnend in einer Nische an der Südwand. Diese zeichnet in ihrem unteren Teil deutlich die Rippen des Heizkörpers nach. Das vertikale Streifenmuster entspricht dem Wechsel von Rippe zu Lücke. Oberhalb der Rippen ist es heller, oberhalb der Lücken dunkler. In Abb. 21 ist die Verschwärzung einer Wandfläche zu sehen. Auch hier ist horizontal ein Abstand zwischen der Höhe des Heizrohres und dem Beginn der Verschwärzung an der Wand zu sehen. In regelmäßigen Abständen tritt die Verschwärzung auch direkt in der Höhe des Heizrohres auf. Das dies mit der Befestigung der Heizkörper an der Wand zusammenhängt ist gut in Abb. 22 zu erkennen.



Abb. 20 Verschwärzung über Heizkörper



Abb. 21 Vergrauung über gesamte Wandfläche



Abb. 22 Schwarzfärbung über Heizrohrbefestigung



Abb. 23 Abdeckblech oberhalb eines Heizkörpers



Abb. 24 Schwarzfärbung über Heizrohrbefestigung



Abb. 25 nach Abbau des Bleches

An den Stellen, an denen das Heizrohr in die Wand fixiert ist, kommt es genau ab diesem Punkt zu einer keilförmig nach oben verbreiterten Verschwärzung an der Wand. Besonders auffällig sind auch die schwarzen Fahnen neben den Blechen. Oberhalb mehrerer Heizkörper sind horizontal Bleche an der Wand angebracht (Abb. 24, Abb. 25). Sie verwirbeln den warmen Luftstrom auf seinem Weg nach oben. Jeweils rechts und links neben den Blechen sind sehr intensive Verschwärzungen der Wandoberflächen zu sehen.

Die Verschwärzung im Gewölbe sollte zwar im Zusammenhang mit der Verschwärzung an den Wänden gesehen, aber doch getrennt betrachtet werden. Zunächst ist festzuhalten, dass 1996 das Gewölbe nicht mit behandelt, nicht gereinigt oder gestrichen wurde. Die Verschmutzungsbelastung spiegelt hier also einen längeren Zeitraum wider. Von unten betrachtet zeichnet sich deutlich ein Fugenbild ab. Es ist teilweise zu beobachten, dass die Fugen, bzw. die Fugenbereiche intensiver verschwärzt sind als die Gewölbeziegel (Abb. 28 bis Abb. 33).

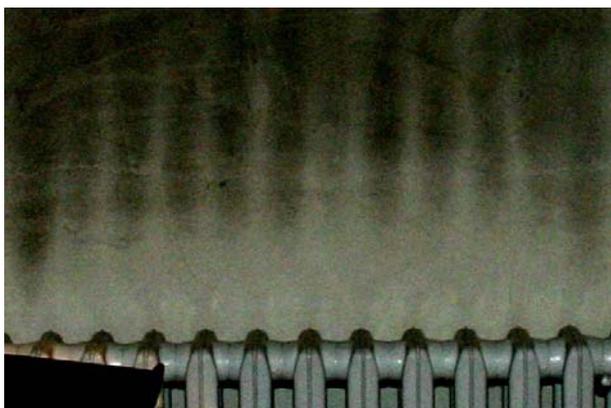


Abb. 26 Ausschnitt aus Abb. 20



Abb. 27 Verschwärzung oberhalb Heizkörper

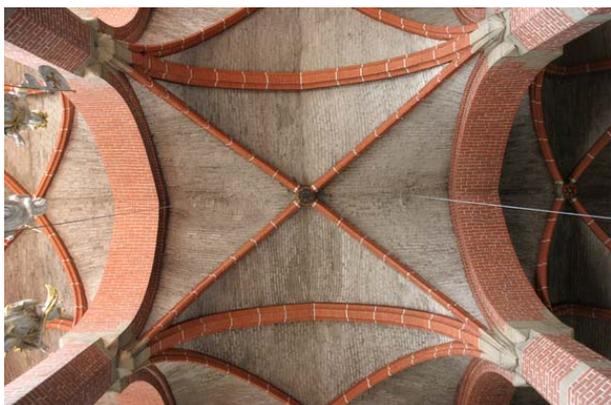


Abb. 28 Gewölbeverschmutzung



Abb. 29 Gewölbeverschmutzung



Abb. 30 Gewölbeverschmutzung

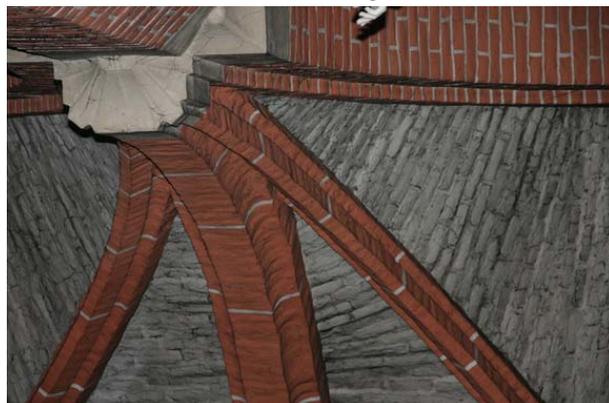


Abb. 31 Gewölbeverschmutzung



Abb. 32 Rußgeschwärtzes Spinnweb im Gewölbe



Abb. 33 Fugennachzeichnende Gewölbeverschmutzung

9.4 Erklärungsmodelle und -ansätze

Für das hier beschriebene Phänomen der Staubablagerung sind verschiedene Bezeichnungen im Umlauf: Verschwärzungen, Verschwärzungserscheinungen, Schwarzstaub, magic dust, fogging oder ghosting. Die auffällig starken Verschwärzungen an den Kirchenwänden vor Beginn der Reinigungs- und Anstricharbeiten sind möglicherweise auf verschiedene Ursachen zurück zu führen. Es sind Effekte wie Thermoeffusion, Sedimentationsprozesse, Sorptionseigenschaften und Strömungseigenschaften der Luft zu berücksichtigen. Unabhängig vom Effekt der Ablagerung von Partikeln aus der Luft an Oberfläche ist die Frage nach der Herkunft der Partikel nicht unerheblich. Eine aufwendige Untersuchung hierzu ist im Rahmen des Projektes allerdings nicht möglich.

Wichtige Hinweise konnten in: <http://www.umweltanalytik.com/ing11.htm> recherchiert werden. Der Begriff Fogging stammt ursprünglich von der Autoindustrie. Mit Fogging wird das Bilden eines Films auf der Windschutzscheibe in Neufahrzeugen als Folge von Ausgasungen schwerer flüchtiger Kunststoffbestandteile bezeichnet. Aber der Begriff wird auch im Bausektor zur Beschreibung von Schwarzfärbungen in Wohnungen eingesetzt. In den meisten Fällen liegt dabei vor dem Auftreten des Foggings eine Renovierung bzw. ein Neubau innerhalb des vorausgegangenen Jahres vor. In fast allen Fällen sind die Ablagerungen während der Heizperiode aufgetreten. Somit scheint hier ein wesentlicher Einflussfaktor zu suchen sein. Meist waren Wohnungsausstattungen vorhanden welche Ausgasungen aus Innenraumfarben, geschäumten Strukturtapeten, Kassettendecken aus Styropor, Heizkörperlacken, Laminatfußböden, Isolschäumen und Standard-Teppichauslegware (Polypropylengeweberücken mit aufgeschäumtem Styrol-Butadien-Kautschuk) sowie Glasfasertapeten. Somit können beim Bau bzw. der Renovierung der Wohnungen und Häusern u.U. Produkte eingesetzt worden sein, die SVOC (semivolatile organic compounds - höhersiedende organische Verbindungen) an die Innenraumluft abgeben. Die Konzentration dieser Verbindungen in der Raumluft ist im Winter (Heizperiode und geringere Lüftung) besonders hoch. Die SVOC können dann an vorhandene Staubpartikel in der Luft angelagert und setzen sich an den betroffenen Oberflächen ab. Die Schwierigkeit einer plausiblen Erklärung besteht darin, dass die o.g. möglichen Einflussgrößen überwiegend auch in anderen Wohnungen bestehen, ohne dass es dort zur Ausbildung der Wandschwärzung kommt. Auch der Zeitverlauf ist stark differierend. So kommt es in den meisten Fällen innerhalb von wenigen Tagen bis Wochen zu sichtbaren Ablagemengen, selten dauert es hingegen Jahre. Für die o.g. Faktoren lassen sich zwar im Einzelnen entsprechende Zuordnungen auf die betreffenden Wohnungen vornehmen. So können Renovierungsmaßnahmen stattgefunden haben, kalte Außenwände sind häufig vorhanden, Wärmebrücken zeigen sich deutlich dadurch, dass dort verstärkt Vergrauung auftritt, auch Kerzenabbrand oder Zigarettenrauch sind ersichtlich. Das Vorliegen dieser Faktoren ist aber nicht zwingend für das Entstehen des Fogging.

Die für die Schwarzfärbung zuständigen Auslöser sind eher nicht einheitlich. Die durch Renovierungen oder Neubau der Wohnung eingebrachten Materialien werden auch sonst verwendet, kalte Außenwände sind i.d.R. vorhanden, damit existieren auch Wärmebrücken. Diese zeigen sich bei einer Fogging-Situation deutlich dadurch, dass dort verstärkt Vergrauung durch erhöhte Staubanlagerung auftritt. Auch Kerzenabbrand oder Zigarettenrauch sind üblich, führen in anderen Wohnungen jedoch nicht innerhalb kurzer Zeit zu sichtbaren Wandbeaufschlagungen. Es konnte häufig festgestellt werden, dass bei Häusern gleicher Bauart der Effekt nur in einer Wohnung auftrat. Der sich in der betroffenen Wohnung befindliche Feinstaub gleicht allerdings nicht der für den Betrachter gleichermaßen erstellten nicht betroffenen Wohnraum. Hier spielt das Nutzungsverhalten sowie die nutzerspezifische Einrichtung eine große und entscheidende Rolle. So kann der Fogging-Effekt bei Wohnräumen mit überheizten Räumen auftreten. Weitaus häufiger sind jedoch Wohnungen betroffen, die nur selten genutzt und damit selten beheizt werden und die Wände stärker auskühlen können. Das Vorliegen bestimmter Faktoren ist somit nicht zwingend für das Entstehen des Fogging.

Als mögliche Hypothese lässt sich folgende Beschreibung abgeben: Durch Renovierung oder Neubau werden eine Vielzahl schwererflüchtige organische Verbindungen (SOV) in Farben, Lacken, Versiegelungen u.ä. in den Innenraum eingetragen. Mit Beginn der folgenden Herbst- und Wintermonate wird die Lüftung verringert, die Gebäudewände, insbesondere die Außenwände, werden kälter, die Kondensationsneigung der in der Luft befindlichen schwererflüchtigen organischen Verbindungen nimmt zu. Die stets in der Raumluft vorkommenden Feinstpartikel erhalten durch Kondensation der SVOC eine chemisch modifizierte Oberflächeneigenschaft,

die zu einer Zusammenlagerung (Aggregation) unter Bildung größerer Partikel führt. Diese werden dann an den Raumoberflächen verstärkt auftreffen und dort, wo sich Temperaturunterschiede zeigen, zu einer unterschiedlichen Schichtausbildung führen. Es verändern sich mit Beginn der Heizperiode die Luftzirkulationsbedingungen, die Luftströmung kehrt sich um: am kalten Fenster vorbei steigt die Luft oberhalb des Heizkörpers nun aufwärts, in der Tiefe des Raumes fällt sie wieder ab. Zusätzliche Feinstaubeinträge aus ruhendem Reservoir sind auf diese Weise möglich. Die Luftfeuchtigkeit sinkt gegenüber dem Sommer stark ab, besonders bei niedrigen Außentemperaturen, was eine Verringerung des Feuchtegehaltes im ständig zirkulierenden Feinstaub nach sich zieht. Die nun leichteren Partikel und die größere Geschwindigkeit der Partikel verstärken die elektrostatische Aufladung durch erhöhte Reibungseffekte an den Oberflächen und zwischen den Partikeln in der Raumluft. Ein Ladungsausgleich wird durch die geringere Leitfähigkeit der trocknen Luft erschwert. Auf diese Weise kann es zu Anhaftung zwischen den Partikeln untereinander und an diversen Oberflächen kommen.

Die Ablagerungen sind meist an Stellen mit erhöhter Luftbewegung, z.B. entlang der Heizkörperluftaustritte, entlang der Wände (meist Außenwände), Fensterrahmen, Fensterglas und Gardinen die über den Heizkörpern angebracht sind sowie an Kältebrücken wie z.B. Rollladenkästen, feuchte Stellen und Ecken an Außenwänden. Oft sind auch kunststoffhaltige Oberflächen (Steckdosen, Lichtschalter, Kunststofffenster, Bad- und Küchenmöbel, sogar Kühlschränke) betroffen. Zeigen sich die Verfärbungen unter meist geschlossenen Türen ist dies ein Indiz für unterschiedliche Luftdrücke in den Räumen. Die Luft aus dem Bereich mit dem höheren Luftdruck strömt in diesen Fällen unter der Tür in das Gebiet mit dem niederen Luftdruck. Der unter der Tür liegende Teppichboden dient dabei als Luftfilter und nimmt die Partikel auf. Verdeckte Stellen, die z.B. durch Möbel oder Bilder verdeckt waren, sind i.d.R. nicht betroffen. Der eigentliche Vorgang des Schwarzwerdens entsteht vermutlich durch die Ablagerung des luftgetragenen Feinstaubes auf dem sich bildenden "klebrigen, öligen Film" von schwererflüchtigen Verbindungen auf bestimmten, oft erhöht weichmacherhaltigen Oberflächen. Bei der dabei entstehenden "Verklumpung" der eigentlich nicht sichtbaren Kleinstpartikel zu größeren Ansammlungen entsteht die Schwarzverfärbung.

Zur Bildung von Rußfahnen kann es auch, unabhängig von der Stärke der Luftströmung, an den heißesten Stellen kommen, wenn die Vorlauftemperatur der Heizung sehr hoch eingestellt ist. Der beim Fogging-Effekt häufiger auftretende typische „weiße Streifen“ entsteht genau in der Kante zwischen Wand und Decke.

Bei Fogging-Effekt können auch elektrostatische Aufladungen, wie sie gehäuft in den Wintermonaten entstehen, zu einer erhöhten Anziehung unterschiedlich geladener Partikel und Flächen führen. Turbulente Strömungen der Luftzirkulation im Raum (z.B. an Bilderrahmen, Wandleuchten, Deckendosen u.ä.) können durch Aufpralleffekte sichtbare Muster einer erhöhten Oberflächenbelegung erzeugen. Bei Verrußungen die durch undichte Kamine bedingt sind, findet sich meist eine gleichmäßige Ablagerung die vor allem auf horizontalen Oberflächen zu finden ist. In den betroffenen Räumen ist meist erkennbar, dass die stärksten Ablagerungen dort auftreten, wo Oberflächen direkt von der Raumluft angeströmt werden. So sind die Verfärbungen über Heizkörpern und Lampen oberhalb von Teppichleisten, hier sammeln sich oft erhöhte Feinstaubmengen, oder an kleinen erwärmten Lücken wie z.B. Heizungsrohrdurchbrüchen, am stärksten. An Stellen, an denen keine starke Konvektion stattfindet, ist i.d.R. keine Schwarzfärbung sichtbar.

Die eigentliche Ursache kann nach jetzigem Kenntnisstand nicht benannt werden. Neben den gebäudebezogenen potentiellen Co-Faktoren (Materialien, Wärmebrücken, Luftkonvektion) auch bewohner-individuelle Beiträge (Einrichtungsgegenstände, Zigarettenrauch, Lüftung, Kerzen) gegeben sind. Der Einfluss von Kerzenruß leistet in einigen Fällen einen erheblichen Beitrag zur Schwarzfärbung. Teilweise konnte nach dem Abbrand einiger Kerzen, meist mit Duftzusätzen, schon ein sichtbarer Belag erreicht werden. Tapeten, die mit Latexfarben gestrichen wurden, weisen eine erhöhte Neigung zur Rußanlagerung auf. Dies ist vorwiegend auf die Weichmacheranteile dieser Farbsysteme zurückzuführen. Die durch die geringe Dämmung von Rollladenkästen verursachten Wärmebrücken sollten so gut wie möglich isoliert werden, um ein größeres Temperaturgefälle gegenüber der Raumwand zu vermeiden. Temperaturmessungen von Oberflächen zeigten ein deutliches Gefälle zum Mauerwerk.

Der grau-schwarz-ölige Belag ist i.d.R. nicht vollständig abzuwaschen, so dass ein Neuanstrich der Wände erfolgen muss. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen werden, dass

gerade durch das Einbringen weiterer polarer Substanzen z.B. aus Wandfarben und Lacken das Phänomen erneut provoziert werden kann. Es sollten bei einem Neuanstrich die Wände im Wohnzimmer mit einer weniger flüssigen Farbe („feste Farbe“) gestrichen werden.

Wärmebrücken, Risse im Mauerwerk und ähnliche Schwachstellen der Isolierung sollten so gut wie möglich isoliert werden, um ein größeres Temperaturgefälle gegenüber der Raumwand zu vermeiden. Da die Art und Menge der kunststoffhaltigen, insbesondere der Weichmacher enthaltenen Materialien, eine entscheidende Grundlage für das Phänomen zu bilden scheint, sollte der Verzicht oder der Wechsel bestimmter Einrichtungsgegenstände erwogen werden.

SVOC-Quellen sollten ausnahmslos entfernt werden. Hierbei sollte speziell auf weichmacherhaltige Baustoffe wie PVC-Böden, Paneele, Latexwandfarben etc. geachtet werden. Kerzen und Öllampen sollten nicht mehr benutzt werden. Auf hohe Lüftungsraten und verstärktes Heizen ist zu achten. Verzichtet werden sollte weitgehend auf elektrostatisch aufladbare Einrichtungen wie Synthetikteppiche und –gardinen oder Kunststoffmöbel (aus: <http://www.umweltanalytik.com/ing11.htm>).

In der Klosterkirche ist mit mehreren Quellen für den Staubeintrag in die Luft zu rechnen. Eine mögliche Ruß-Quelle sind dabei die Kerzen.

Ergänzend zu den vorangegangenen, das Phänomen beschreibenden Ausführungen sollte der Effekt der Thermodiffusion, der auf den 1. Expertentreffen als ein Erklärungsmodell dargestellt wurde, berücksichtigt werden. Das Modell der Thermodiffusion (auch: Thermophorese, Ludwig-Soret-Effekt) beschreibt die Bewegung von Aerosolteilchen entlang eines Temperaturgradienten, typischerweise von heiß nach kalt in Gasen und Flüssigkeiten. Der Effekt tritt bei Aerosolen und Staubteilchen in Luft auf. Dabei prasseln von allen Seiten Luftmoleküle auf ein Staubteilchen ein. Die statistischen Fluktuationen führen zur Brown'schen Bewegung. Die Bewegung ist statistisch und ungerichtet. Falls sich das Teilchen jedoch in einem Temperaturgradienten befindet, treffen auf der heißen Seite schnellere Moleküle auf als auf der kalten - das Teilchen erfährt also einen Nettoimpuls in Richtung der kalten Seite. Die Bewegung ist zwar immer noch statistisch, aber das Teilchen bewegt sich über lange Zeiten in Richtung kalt. In einer weniger wissenschaftlichen Betrachtungsweise wird als Thermodiffusion der Prozess bezeichnet, bei dem es zur Anlagerung von Partikeln aus warmer Luft auf eine kalte Oberfläche kommt. So wird Thermodiffusion häufig für das Phänomen der Verschwärzung verantwortlich gemacht. In der Nähe von Heizkörpern lagern sich kleine Staubpartikel an Wänden an. Die Staubablagerung erfolgt bevorzugt im Winter, weil dann die Heizungen wärmer und die Wände kälter sind als zu anderen Jahreszeiten.

In der Klosterkirche gibt es wie bei der Beschreibung des Fogging bereits mehrmals festgestellt mehrere Hinweise, die Thermodiffusion nicht als alleinige Erklärung für die Verschwärzung zulassen. In Abb. 21 und Abb. 22 ist deutlich zu erkennen, dass die Verschwärzung ganz intensiv oberhalb der Heizrohrbefestigung in die Wand auftritt. Es ist davon auszugehen, dass diese Befestigung aus Metall einen kleinen Teil der Wärme aus dem Heizrohr konduktiv in die Wand leitet. Daher wird die Wand im direkten Kontakt zu dem Heizkörper etwas über die restliche Wandtemperatur angehoben. Im Falle der Verschwärzung durch Thermodiffusion müsste also dieser Bereich eher sogar noch heller bleiben, da es in der Umgebung kälter ist. Das Umgekehrte ist in der Realität der Fall.

Die Verschwärzungen treten an den Wänden insbesondere oberhalb der Heizkörper im Kirchenschiff auf. Heizkörper sind sowohl an der Südwand als auch an der Nordwand angebracht. Die Südwand ist im Prinzip eine Innenwand, da sie das Mittelschiff der Klosterkirche vom dem als Kreuzgang genutzten südlichen Seitenschiff abtrennt. Ein Vergleich der Verschmutzungen an der Südwand mit den Verschmutzungen an der Nordwand zeigt, dass die Intensität in etwa gleich ist. Die Verschmutzung ist am intensivsten oberhalb der Heizkörper. Unterschiede im Verschmutzungsgrad zwischen Nord- und Südwand sind nicht zu erkennen. Aber es gibt deutliche Unterschiede in der Temperatur der Wände. Die Südwand hat über das Jahr eine kaum veränderte Temperatur, hingegen die Nordwand kühlt im Winter stark herunter. Nach dem Prinzip der Thermodiffusion müsste also die Nordwand stärker verschwärzt sein, da sie kälter ist.

Als besonders auffällig ist der Bezug der schwarzen Verunreinigungen zu Flächen, die besonders von Luft umspült sind, zu verzeichnen. Als augenfälligstes Beispiel sind hier die Abdeckbleche zu nennen. Die Verunreinigung beginnt oberhalb des Heizkörpers unterhalb des Bleches in einem Bereich, in dem davon auszugehen ist, dass es dort zu einer Luftwalze kommt. Dann strömt die Luft rechts und links am Blech vorbei nach oben. Um diese Ecken sind die Ablage-

rungen besonders gut zu erkennen. Nach oben dünnen sie in einer langen Fahne aus. Hier sind verschiedene Effekte gegeneinander abzuwägen. Die Luft strömt an den Ecken relativ schnell vorbei, etwas weiter weg langsamer. Daraus folgt, dass an den Ecken im gleichen Zeitraum auch mehr Luft vorbeiströmt als in geringer Entfernung dazu. Daher werden diese Stellen auch etwas stärker erwärmt als die anderen. Einen möglichen Zusammenhang zur stärkeren Verschmutzung kann als das Mehr an Luft, die vorbeiströmt bedeuten. Die schnellere Strömungsgeschwindigkeit erschwert eigentlich eine Ablagerung von Teilchen. Ebenso wie ein erwärmter Bereich eher weniger anlagern müsste. Allerdings ist der Temperatureffekt wiederum eigentlich ein kinetischer. Das heißt, dass zu Beginn eines Beheizungsereignisses die Temperatur der Wandoberfläche zunächst überall gleich ist und an den Ecken erst in der Folge stärker aufgeheizt werden.

Im Gewölbe stellt sich die Situation etwas anders dar. Hier ist mit geringerer Luftströmung im Vergleich zu den Heizungsblechen zu rechnen. Die Verschwärzung ist zunächst überall in den Gewölbeflächen zu finden. Es zeichnet sich teilweise das Fugenbild ab, d.h. der Bereich unter dem sich die Fugen befinden ist intensiver verschwärzt als die Steine (Abb. 28, Abb. 33, Abb. 38). Bei genauerer Betrachtung wird dieses Bild allerdings nicht durchweg bestätigt. In den Gewölbeflächen innen treten unterschiedliche Situationen auf. Dabei fällt auch auf, dass die Zwickel im unteren Teil des Gewölbes heller also weniger verschmutzt sind (Abb. 34, Abb. 35). Es gibt im Erscheinungsbild eine Korrelation zu den Ergebnissen der IR-Thermographie. In den infrarotthermographischen Aufnahmen (Abb. 93, Abb. 95) ist zu erkennen, dass erstens zum Aufnahmezeitpunkt die Fugen kälter sind als die Steine. Zweitens sind die Zwickelbereiche wärmer als die Gewölbeflächen. Die Zwickel sind massiver als die Gewölbekappen.



Abb. 34 heller Gewölbefuß (Ausschnitt aus Abb. 28)



Abb. 35 heller Gewölbefuß (Ausschnitt aus Abb. 29)

Bei der Frage nach den Partikelquellen sind zwei Einträge zu nennen: Erstens ist das der Eintrag von Schmutz an den Schuhen der Besucher. Zweitens kann ein nicht unerheblicher Anteil an Rußpartikeln durch Kerzenabbrand in die Luft gebracht werden. Die in den letzten Jahren verwendeten Kerzen scheinen sehr rußanfällig zu sein. Das könnte einen Teil der Verschwärzungen erklären. Wie die Farbe der Ablagerungen belegt und auch die Farbe der Spinnweben im Gewölbe vermuten lassen, besteht ein großer Teil der Ablagerungen aus schwarzem Ruß.

Kerzengüterverband Empfehlungen

Die schrägstehende Kerzenflamme von Abb. 36 war eigentlich dokumentiert worden, um den Luftzug als solchen im Nordschiff der Klosterkirche zeigen zu können. Aber das Bild weist dabei auch auf eine weitere Folge des Luftzuges hin. Wie in Abb. 37 deutlich zu erkennen, entstehen bei bewegten Flammen vom Kerzenbrand besonders viele Rußpartikel. Das kann mit dem unvollständigen Brand, der durch die Bewegung der Flamme entsteht, gut erklärt werden.



Abb. 36 Kerze in der Klosterkirche, aufgestellt im östlichen Nordschiff



Abb. 37 bei bewegter Flamme entsteht viel Ruß

9.5 Konsequenzen

Eine Quelle für Staub ist der Schmutz an den Schuhen der Besucher. Dieser Schmutzeintrag lässt sich durch effektive Fußmatten im Eingangsbereich gut reduzieren. Es wird daher empfohlen Fußmatten auszulegen und regelmäßig zu reinigen.

Die Kerzen sollten nach ihrer Güte kontrolliert und gegebenenfalls durch rußarme Gütekerzen ersetzt werden.



Abb. 38 Verschwärzung verschmiert auf der Oberfläche



Abb. 39 ... und bleibt teilweise haften



Abb. 40 Vergrautes Fugenbild



Abb. 41 Risse zwischen Fuge und Ziegel intensiv verschwärzt

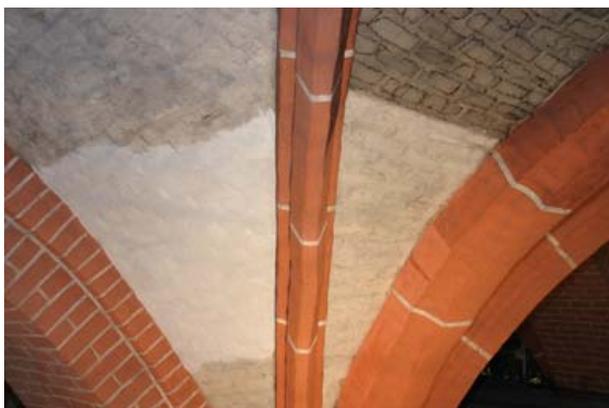


Abb. 42 Reinigungsmusterflächen



Abb. 43 Reinigung im Gewölbe

10 Nutzungsdefinitionen

Das Kloster St. Marienstern blickt auf eine lange Geschichte, die Klosterkirche damit auf eine fast ununterbrochene Nutzung zurück. Diese für ein Denkmal ausgesprochen gute Situation unterscheidet sich immens sowohl von typischen Nichtwohngebäuden als auch von der Nutzung von Wohnraum. Die Klosterkirche wird von den Schwestern mehrmals täglich genutzt. Über die Woche kommen noch Gottesdienste und Andachten hinzu, an Sonn- und Feiertagen die entsprechenden weiteren Gottesdienste. In Tab. 1 sind die täglichen Gebetszeiten der Schwestern dargestellt und wöchentliche Andachten angegeben. In der Fastenzeit, im Mai und im Oktober werden diese durch weitere Andachten ergänzt. Am Sonntag sind die angegebenen Zeiten etwas versetzt und werden durch Messen vervollständigt.

Tab. 1 Nutzungszeiten der Klosterkirche ohne Sonn- und Feiertage

Uhrzeit	Schwestern	Gemeinde
4.30 (ca. bis 5.20)	Vigilien (Nachtwache)	
6.00 (ca. bis 6.35)	Laudes (Morgenlob)	
7.00 (ca. bis 7.40)	Hl. Messe	
7.40(anschl.) (ca. 15 min)	Terz (Gebet zur 3. Stunde)	
8.00 Uhr		Gemeindegottesdienst (Mittwoch)
11.30 (ca. bis 11.55)	Sext und Non (Gebet zur sechsten bzw. neunten Stunde)	
15.30 (bis ca. 16.20)		Kindergottesdienst anschl. Rosenkranzandacht (Dienstag)
17.00	Vesper (Abendlob)	
19.00	Komplet (Gebet zur Nacht)	
19.30		Gemeindegottesdienst (Freitag)

Diese über den Tag und die Woche betrachtet semikontinuierliche Benutzung bringt auch eine Erweiterung der Nutzungszonen mit sich. Diese Nutzungszonen sind der Übersicht halber in Abb. 44 aufgeführt.

- 1 - Mensa, vom Pfarrer genutzter Bereich
- 2 - Chorgestühl, der am häufigsten genutzte Teil der Kirche
- 3 - erste vier Bankreihen, diese werden zum Teil von den Schwestern und zu den Andachten von einem kleinen Teil der Gemeinde genutzt
- 4 - restliche Bankreihen, werden zu den Sonntagsmessen besetzt
- 5 - Stuhlreihen im nördlichen Seitenschiff
- 6 - Orgel
- 7 - gesamter Kirchenraum, spielt bei der Betrachtung immer wieder eine Rolle und wird daher als eigene Zone definiert.

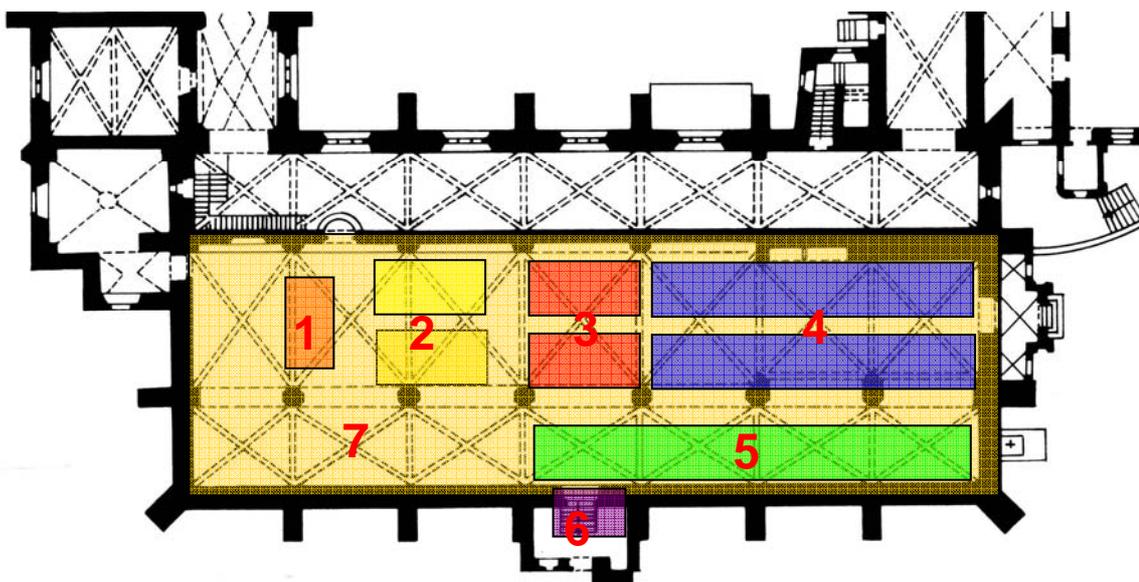


Abb. 44 Zonenteilung der Klosterkirche

Abb. 44 zeigt eine Zoneneinteilung die früh im Projekt entwickelt wurde. Die Zoneneinteilung wurde im Verlauf des Projektes wieder vereinfacht. Trotzdem zeigt das Bild anschaulich, mit welchen unterschiedlichen Bereichen in der Kirche zu rechnen ist.

11 1. Expertentreffen

Das Expertentreffen am 18. September 2007 in Marienstern diente zur Sammlung von Erfahrungen aus dem überregionalen Raum. Der Umbau von Heizungssystemen in Denkmälern mit historischer Ausstattung unter Berücksichtigung der Nutzung und Energieeffizienz ist eine immer individuelle und schwierige Aufgabe. Insbesondere lernt man aus Rückschlägen, die aber selten publiziert werden können. Bei diesem Treffen war eine offene Diskussion zwischen allen Beteiligten möglich. In der Tagesordnung war die Darstellung einzelner Aspekte, die für das Vorhaben relevant waren, als Kurzvorträge und Diskussionsgrundlage vorgesehen. Der Hauptaspekt des Treffens war dennoch die Kommunikation und der offene Erfahrungsaustausch. Als Experten nahmen an dem Treffen teil:



Dipl.-Ing. Lutz Baumann
Ingenieurbüro NIEHSEN-BAUMANN
Wiesenufer 7
09123 Chemnitz
03 72 09 / 8 04 01
info@niehsen-baumann.de

0351 / 48430 410/427/408
franzen@idk-info.de
loether@idk-info.de
schmid-kamke@idk-info.de
weise@idk-info.de

Dipl.-Ing. Wulf Eckermann
BAUKLIMA Ingenieurbüro
Dennis Gabor Str. 2
14469 Potsdam
0331 / 7308160
wulf.eckermann@bauklima.de

Dr.-Ing. Olaf Freytag
Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH)
Fachbereich Bauwesen / Hochbau
Postfach 30 11 66
D-04251 Leipzig
0341 / 30766650
freytag@fbb.htwk-leipzig.de

Dr. Christoph Franzen
Dipl.-Ing.(FH) Thomas Löther
Dipl. Ök. Ellen Schmid-Kamke
Dipl.-Ing. Stefan Weise
Institut für Diagnostik und Konservierung an
Denkmälern in Sachsen und Sachsen Anhalt
Schloßplatz 1
D-01067 Dresden

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch
Institut für Diagnostik und Konservierung an
Denkmälern in Sachsen und Sachsen Anhalt
Domplatz 3
06108 Halle
0345 / 47225721
kalisch@idk-info.de



Prof. Dr. Rosemarie Pohlack
Dr. Rest. Christine Kelm
Dipl.-Ing. Dietrich Berger
Landesamt für Denkmalpflege Sachsen
Schloßplatz 1
01067 Dresden
0351 / 48430 416
Christine.Kelm@lfd.smi.sachsen.de

Dipl.-Rest. Ralf Kilian
Fraunhofer Institut für Bauphysik
Fraunhoferstraße 10
83626 Valley
08024 / 643285
ralf.kilian@ibp.fraunhofer.de

Dipl. Ing. Johannes Lukasch
Schwester Thaddäa Selnack
Schwester Benedicta Waurick
Zisterzienserinnen – Abtei
St. Marienstern
Ćišinskistr. 35
01920 Panschwitz-Kuckau
035796 / 99412
verwaltung@marienstern.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roloff
Dipl.-Ing. Uwe Meinhold
Institut für Bauklimatik
Technische Universität Dresden
Zellescher Weg 17 (BZW)
01062 Dresden
0351 / 4633 2950
jdroloff@web.de
uwe.meinhold@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Alexandra Troi
Eurac research, Europäische Akademie Bozen
Drususallee 1
I - 39100 Bozen
+39 (0471) / 055314
alexandra.troi@eurac.edu

Dr.-Ing. Liane Vogel
Fachbereich Bauphysik - Bauklimatik
FH Zittau
Gebäude Z II
03583 / 61 1648
03583 / 61 1627
l.vogel@hs-zigr.de

11.1.1 Programm des Expertentreffens am 18. September 2007

ERÖFFNUNG

08:30 **Begrüßung**

Äbtissin Sr. Benedicta Waurick, Kloster St. Marienstern, Panschwitz Kuckau

Landeskonservatorin Prof. Dr. Rosemarie Pohlack, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Dresden

EXPERTENTREFFEN

08:45 **Einführende Darstellung des Projektvorhabens**

Dr. Christoph Franzen, IDK e. V., Dresden

08:50 **Nutzungsgeschichte und aktuelle Nutzung der Klosterkirche, Nutzungsprobleme**

Sr. Thaddäa Selhack, Kloster St. Marienstern, Panschwitz-Kuckau

09:00 **Sanierungsvorhaben, Schäden- und Schadensbeseitigung, Energieverbrauch**

Dipl. Ing. Johannes Lukasch, Kloster St. Marienstern, Panschwitz-Kuckau

09:10 **Messkonzept, Ziel der Computersimulationen**

Dipl. Ing. Thomas Löther, IDK e. V., Dresden

Dipl. Ing. Uwe Meinhold, Inst. für Bauklimatik, TU, Dresden

09:25 **Moderne Bankheizungen - Chancen und Probleme**

Dipl. Ing. Lutz Baumann, Beratender Ingenieur, Chemnitz

09:35 **Erfahrungen aus Kirche im alpinen Bereich**

Dipl. Ing. Alexandra Troi, EURAC, Bozen

09:45 **Diskussion**

09:55 – 10:15 KAFFEE

BESUCH DER KLOSTERKIRCHE

10:15 **Klimagefährdete historische Innenausstattung**

DIPL. REST. CHRISTINE KELM, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Dresden

10:25 **Ortsbegehung, Schadensbegutachtung**

OFFENE DISKUSSION

alle

12:40 **Zusammenfassende Diskussion (Seminarraum)**

13:00 - 13:50 MITTAGESSEN IM KLOSTER

ABSCHLUSS

13:50 **GRUPPENFOTO**

ALLE

11.1.2 Ausschnitte aus der Diskussionsrunde zum 1. Expertentreffen

- Roloff: Was ist in der Kirche Marienstern besonders?
- Nutzung durch die Schwestern: diskontinuierliche, regelmäßige Nutzung
 - Kirchengemeinde: einige Bankreihen in Nutzung
 - „normale Kirche“ am Wochenende durch Gottesdienste (volle Kirche)
- Freytag: Umgestaltung des derzeitigen Zustandes aus welcher Sicht?
- Zur Verhinderung von Zugscheinungen?
 - Um Heizkosten zu Senken?
- Kalisch: Anregung zur Energieeinsparung
- Möglichkeiten der Selbsterzeugung von Energie nutzen und diese dann mit einem finanziellen Gewinn in das Energienetz einspeisen.
 - Mit diesem Gewinn an heizintensiven Tagen zusätzlich Energie einkaufen. Dadurch kann eine großzügigere Beheizung (Temperierung) möglich werden. – genaue Berechnung notwendig
- Eckermann: Wo besteht in der Kirche ein Handlungsbedarf?
- unzureichende Behaglichkeit und unangenehme Zugscheinungen,
 - Schutz des Kunstgutes und der Raumlülle vor erneuter Verschmutzung,
 - Kostensenkung bei der Heizung
- zu 1. Verweis auf den Vortrag von Baumann (abgespeichert)
zu 2. Verschmutzung entsteht vor allem durch eine warme Raumluff bei gleichzeitig kalten Oberflächen. Es bildet sich Kondensat an dem sich Staub aus der Raumluff anhaftet.
- Kilian: Anregungen zum Messkonzept.
- Messen der Luftgeschwindigkeit unterhalb und zwischen den Fenstern.
 - Zusammenhang von Außen- und Innentemperatur für die Luftgeschwindigkeit bestimmen. Bei welcher Außen- und Innentemperatur sind die Luftgeschwindigkeiten an den Fenstern am größten?
- Kalisch: Überlegung
- Heizung im Chorgestühl von der Kirchenheizung baulich abkoppeln und die Kirchenheizung nur zur Unterstützung in der kalten Jahreszeit einsetzen.
 - Betriebszeiten der Heizkörper reduzieren. Dies würde eine Verringerung der Luftbewegung bewirken.
- Roloff: Gibt es Erkenntnisse über die Art der Luftbewegung / Luftströmung?
- Rauchversuch
 - Wärme muss im Kirchenschiff gleichmäßiger Verteilt werden.
 - Überlegung zu einer Temperierung der Wandsöckel.
- Meinhold: Erklärung der Raumverschmutzung durch die Thermoeffusion.
- Weise: Frage zur Notwendigkeit einer Dämmung des Gewölbes
- und zu einer Isolierschutzverglasung der Fenster.
- Kilian: Fenster sind in solchen Gebäuden der neuralgische Punkt. Es besteht die Gefahr von Kondensatbildung an kalten Konstruktionsbauteilen (Stege). Seele hat eine Beheizung solch gefährdeter Stege gefordert.
- Vogel: Führte als Beispiel die neu eingebauten Fenster in der Marienkirche in Zittau an Die messtechnische Begleitung läuft noch. Als Nachteil wurde aber die nicht mehr von außen wahrnehmbaren Bleiglasfenster angeführt.

- Meinhold: Die geplanten Behaglichkeitsmessungen werden im Kirchenschiff verteilt an verschiedenen Punkten durchgeführt.
- Löther: stellt die Messorte vor.
- Kalisch: Verschmutzung
- Was ist die Quelle dieser starken Verschmutzung?
 - Sind es nur die Kerzen?
 - Staub von Besuchern?
- Freytag: Tauwassergefahr an den Wänden / Fenstern?
- Löther: Messung des Tauwasserausfalls ist im Messprogramm enthalten.
Fühler muss noch installiert werden.
- Eckermann: Im Kirchenschiff sollten kontinuierliche Messungen der Luftströmung erfolgen.
- Löther: Strömungsmessgeräte werden punktuell aufgestellt.
- Freytag: Luftströmungen können auch durch Rauchversuche dargestellt werden.
- Löther: Wird berücksichtigt.
- Roloff: Reicht eine Veränderung der Heizung aus?
- an flankierende Maßnahmen denken: Wärmeschutzverglasung, Gewölbedämmung, Wanddämmung
- Franzen: Wie kalt wird eine ungeheizte Kirche?
Welche Grundtemperatur wollen / können wir uns leisten? <10°C
- Kilian: Beispiel Untersuchungen in Schweden (Jan Holmberg).
- Frost war bei diesen Untersuchungen in historischen Gebäuden eigentlich kein Problem.
- Baumann: Anmerkungen
- Reichen 10°C Raumlufttemperatur als Grundtemperatur?
 - Wie verhält sich die Zugluft bei 10°C Raumlufttemperatur?
 - Luftgeschwindigkeiten über 0,1 – 0,15 m/s werden als störend empfunden.
 - Dämmung des Gewölbes nicht sinnvoll – Wärmebedarf und Wärmeverluste ermitteln und dann erst entscheiden.
 - Um Zugluft und eine Raumverschmutzung zu vermeiden, muss die Wärmeverteilung gleichmäßig im Raum erfolgen, z.B. Fußbodenheizung.
- Freytag: Frage zur Herkunft der Verschmutzung und deren Zusammensetzung.
- Wenn möglich den Luftstaub messen.
 - Zur Vermeidung einer Neuverschmutzung im Eingangsbereich Schmutzfangmatten auslegen.
- Kilian: Hält Dämmung des Gewölbes für sinnvoll.
- Beispiel für gelungene Dämmung: Renatuskapelle im Schloss Oberschleißheim.
 - Durch eine Fußbodenheizung erfolgt die größte Verschmutzung eines Raumes und sie stellt den größten baulichen Eingriff in die Bausubstanz dar.
 - Ist es sinnvoll die Hüllflächen zu erwärmen?
- Eckermann: Haben wir eine falsch beheizte Kirche (und daher die Verschmutzung) oder haben wir eine dreckige Kirche?
- Man sollte das alte Heizkonzept überprüfen und bewerten. (1960)

- Freytag: Fragt nach Heizstrahlern für die Bankheizung.
- Roloff: Direkte Bestrahlung durch Heizstrahler im Raum verteilt?
- Alle: Nicht empfehlenswert, da solche Systeme zu großen Schäden an der Ausstattung führen. Architektonisch kaum integrierbar.
- Franzen: Unterschied Warmwasserheizung (WWH) und Elektroheizung (EH)?
- Lukasch: Vorteil der WWH da die Wärme selbst produziert werden kann. Für eine Grundtemperierung in der Kirche geeignet.
- Baumann: 3 Heizkreise:
 - 1. Grundtemperatur in der Kirche
 - 2. Bankheizung (Chorgestühl und Bankreihen)
 - 3. Volllast
 - EH nur zur Ergänzung im Chorgestühl
- Kilian: Art der Wärmeverteilung in der Kirche ist mit Strom einfacher.
- Roloff: Unterschiedliche Heizkreise herstellen.
- Freytag: Kapillarrohrmatten für Bankheizung.
 - Problem der Wartung – Verschlammung
- Kalisch: Vorteil von WWH – Rohren besteht in der Möglichkeit einen Wärmetauscher einzusetzen.
- Meinhold: Vorteil bei der Bankheizung – aber Detailprobleme
 - Aber mit was wird eine Grundtemperierung erreicht?

12 Bestehende Heizungsanlage in der Klosterkirche

Die Angaben zu einer möglichen Beheizung der Klosterkirche im Mittelalter sind spärlich. Winzeler (2008) beschreibt, dass „... Neufassung erfolgte 1860-1861. (...) Starke Feuchtigkeitsschäden und die Auswirkung der neuen Heizung machten bereits dreißig Jahre später eine komplett Erneuerung nötig. 1891-1892 wurde die ältere Fassung vollständig übermalt, ...“. Daher ist von einem Einbau einer Heizung um oder nach 1860 und vor 1891 auszugehen. Angaben, wie diese Heizung ausgesehen haben könnte, liegen keine vor. Diese Anlage schien für eine starke Verschmutzung im Innenraum auch in der Folge verantwortlich gewesen zu sein. „1932 wurde das verrußte Innere der Kirche neu ausgemalt.“ (Winzeler 2008) Demnach war der Innenraum nach 40 Jahren wieder stark verrußt. 1933 wurde an den Chor im Osten ein Heizhaus angebaut (Abb. 46). Mit einem kohlebetriebenen Heizkessel wurden die Heizkörper in der Klosterkirche mit heißem Wasser versorgt. Die 1933 in die Klosterkirche eingebauten Gußheizkörper waren bis 2008 in Betrieb.

Die Wärmeabgabe in der Klosterkirche erfolgt über verschiedene Typen von Heizkörpern und offen verlegten Heizleitungen. Diese sind im gesamten Kirchenschiff und auf der Chorgasse verteilt. In Abb. 45 Anordnung der bestehenden Anlage in der Klosterkirche dargestellt und in den Abb. 47 bis Abb. 53 die unterschiedlichen Typen gezeigt.

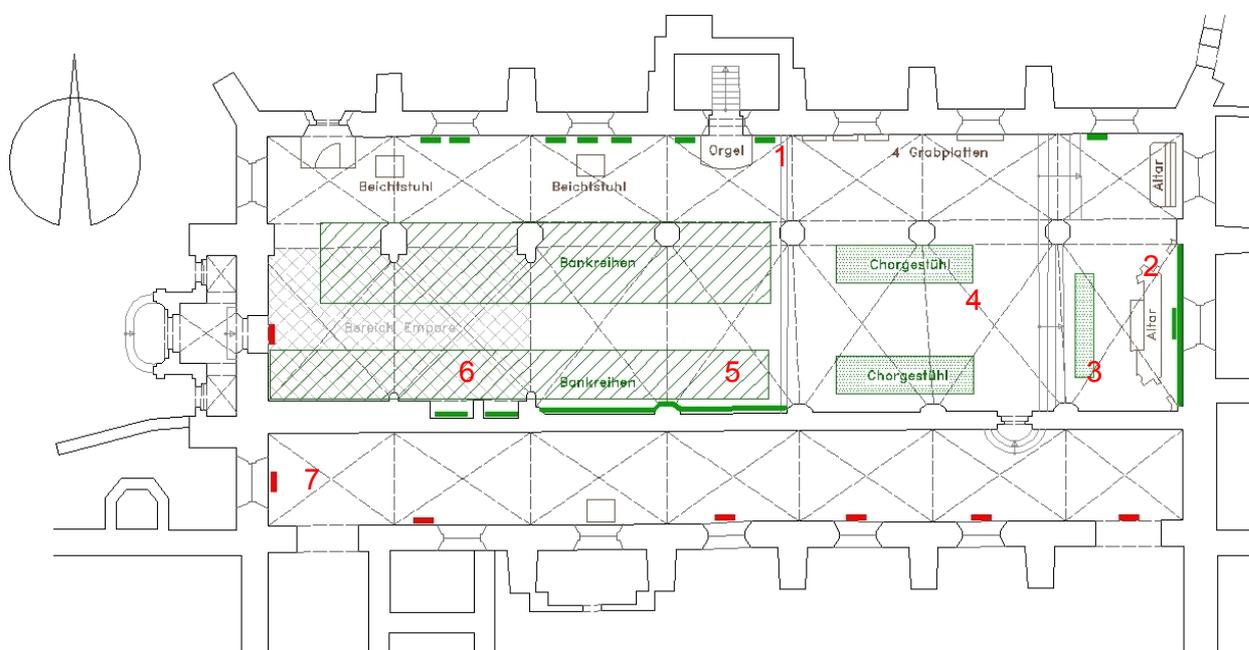


Abb. 45 Anordnung der Heizkörper in der Klosterkirche St. Marienstern / rot – Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore; grün – Heizkörper im Kirchenschiff (Bankreihen haben keine Heizkörper) / Die Zahlen werden in den weiteren Abbildungen erläutert

Gesteuert wurde die Beheizung der Kirche manuell über Thermostatventile je nach Temperaturbedarf. Durch diese manuelle Steuerung gelang es die Raumlufttemperatur im Kirchenschiff in der Heizperiode zwischen 10°C und 12°C zu halten. Einzelne frei voneinander regelbare Heizkreisläufe liegen nicht vor.



Abb. 46 altes Heizhaus



Abb. 47 Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort:
8x Nordwand, 1x hinter Altar, Nr. 1 in Abb. 45

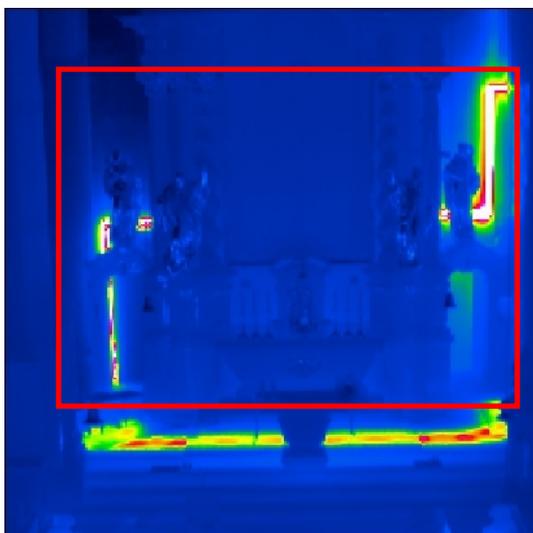


Abb. 48 offen verlegte Heiztrasse, für Versorgung der
Heizkörper an der Nordwand, Durchmesser: 8
cm, Einbauort: hinter Altar, Nr. 2

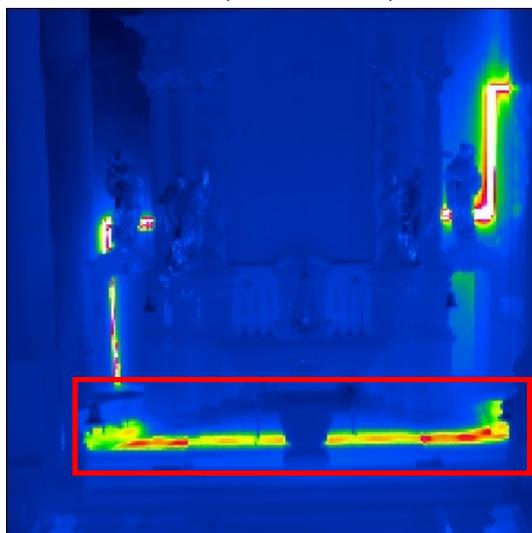


Abb. 49 Fußbodenheizung vor dem Altar, für Lokal-
temperierung des Priesters bei Gottesdien-
sten, Nr. 3

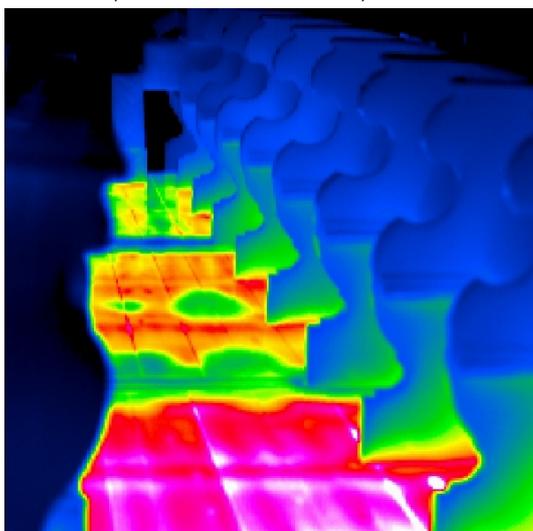


Abb. 50 Fußbodenheizung im Chorgestühl, verlegt
unter Holzpodest, Nr. 4



Abb. 51 meanderförmig verlegte Heiztrasse, Durch-
messer 8 cm, Einbauort: an Südwand im 3.
und 4. Joch, Nr. 5



Abb. 52 Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort:
2x an der Südwand unter Empore in Wandni-
schen, Nr. 6



Abb. 53 Gussheizkörper im Kirchenschiff, Einbauort:
5x an der Südwand auf der Chorgasse, 2x an
der Westwand auf der Chorgasse und der
Nonnenempore, Nr. 7

13 Raumklimatische Untersuchungen

13.1 Messkonzept

Die raumklimatischen Untersuchungen der Klosterkirche St. Marienstern hatten zur Aufgabe, die bestehende klimatische Situation im Kirchenschiff zu erfassen und zu bewerten. Gleichzeitig sollte der Einfluss der Beheizung, der Nutzer und des Außenklimas auf den Kirchenraum beurteilt werden. Dazu erfolgten vier verschiedene messtechnisch umfangreiche Untersuchungen. So wurde das Raumklima an unterschiedlichen Messbereichen des Kirchenschiffs erfasst. Diese Messbereiche waren: Außenbereich, Messachse Südwand – Gewölbepfeiler – Nordwand und Messachse Gewölbeunterseite - mittlere Raumhöhe - Besucherbereich. Aus diesen Daten konnten dann für einen Jahreszyklus Aussagen über die raumklimatischen Zustände in der Klosterkirche über die Gebäudebreite und -höhe getroffen werden.

Für die Erarbeitung der Neukonzeption der Beheizung des Kirchenschiffs, war es außerdem wichtig das bestehende „Behaglichkeitsgefühl“ der Nutzer zu erfassen. Dazu erfolgte eine Behaglichkeitsmessung an verschiedenen Sitzbereichen im Kirchenschiff.

Nach Anregungen aus dem 1. Expertentreffen im September 2007 erfolgte die messtechnische Erfassung von Luftströmungen unterhalb einer unbeheizten Fensterfläche. Hier sollte die Stärke der Fallwind, ausgehend von den kalten Fensterflächen, ermittelt werden. Ein zweiter Messfühler sollte dann den Einfluss aus diesen Fallwinden auf das Chorgestühl erfassen. An zwei kühlen Wintertagen erfolgte eine Visualisierung der Luftströmung durch einen größeren Rauchversuch. Hier konnten Luftwalzen die sich im Kirchenschiff ausbildeten verfolgt werden.

Eine durchgeführte Langzeit-CO₂-Messung erbrachte Informationen über die Besuchermenge und die Luftwechselrate in der Klosterkirche. Durch eine angepasste Berechnungsmethode konnte die Luftwechselrate in der Klosterkirche relativ exakt zu bestimmen.

13.2 Raumklimamessungen

13.2.1 Vorgehensweise und Messkonzept

Die Auswertung der Raumklimamessungen in der Klosterkirche St. Marienstern bezieht sich auf den Untersuchungszeitraum vom 31.07.2007 bis zum 17.07.2008. Zum Einsatz kamen Datenlogger DK 500 mit Messfühlern der Firma Driesen + Kern.

Die Genauigkeit der Messfühler beträgt:

Temperatur: bei 0°C - +40°C	± 0,3°C
rel. Feuchte: bei 10% - 90%	± 1,8% rel.LF

Die Messungen erfolgten in einem Messtakt von 15 Minuten. Das Messkonzept der Raumklimamessung umfasste insgesamt 13 Messpunkte (MP). Die Standorte dieser 13 Messpunkte ist im Grundriss und Schnitt in Abb. 54 eingezeichnet.

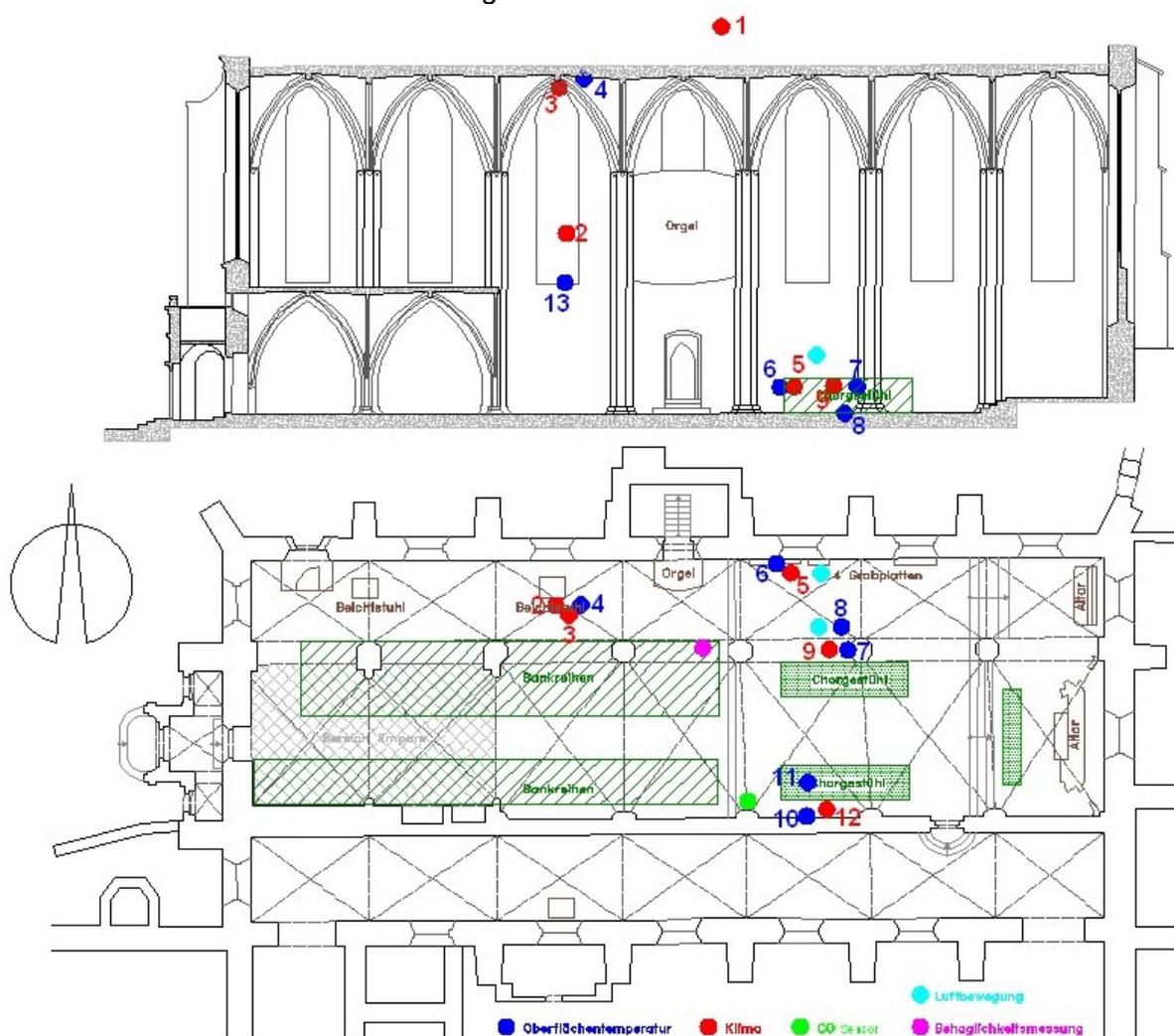


Abb. 54 Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit den Messpunkten der Raumklimamessung

In Abb. 55 bis Abb. 67 werden alle Messpunkte gezeigt und daneben die dort gemessenen bzw. berechneten Messwerte angegeben.



Abb. 55 Messpunkt 1

- relative Luftfeuchte der Außenluft, gemessen im Dachreiter
- Lufttemperatur der Außenluft, gemessen im Dachreiter
- absolute Luftfeuchte der Außenluft, berechnet

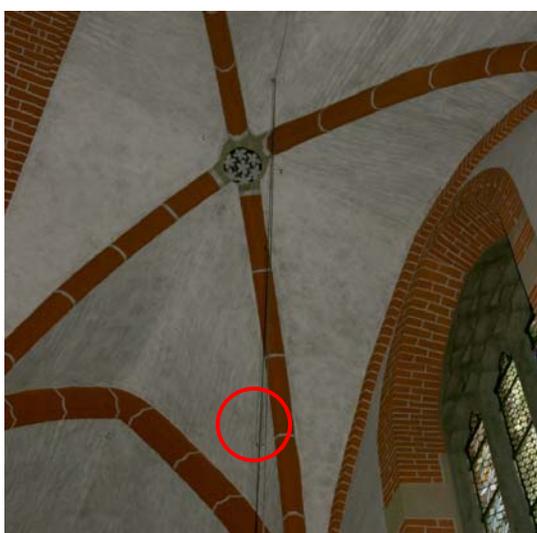


Abb. 56 Messpunkt 2

- relative Luftfeuchte der Raumluft in Raummitte, ca. 10,0 m Höhe über Fußboden
- Lufttemperatur der Raumluft in Raummitte, ca. 10,0 m Höhe über Fußboden
- absolute Luftfeuchte der Raumluft in Raummitte, ca. 10,0 m Höhe über Fußboden
- Taupunkttemperatur der Raumluft ca. 10,0 m Höhe über Fußboden

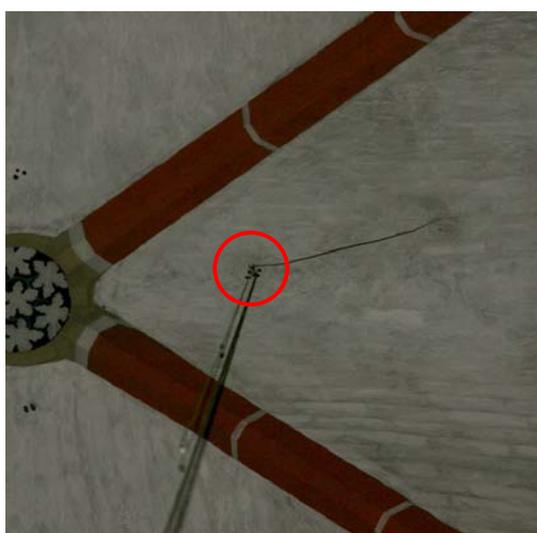


Abb. 57 Messpunkt 3

- relative Luftfeuchte der Raumluft unter Gewölbe, ca. 17,4 m Höhe über Fußboden
- Lufttemperatur der Raumluft unter Gewölbe, ca. 17,4 m Höhe über Fußboden



Abb. 58 Messpunkt 4

- Oberflächentemperatur an der Gewölbeunterseite
ca. 17,4 m Höhe über Fußboden



Abb. 59 Messpunkt 5

- relative Luftfeuchte der Raumluft vor der Nordwand
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden
- Lufttemperatur der Raumluft vor der Nordwand
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 60 Messpunkt 6

- Oberflächentemperatur der Nordwand
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 61 Messpunkt 7

- Oberflächentemperatur Pfeiler
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 62 Messpunkt 8

- Oberflächentemperatur des Granitfußbodens



Abb. 63 Messpunkt 9

- relative Luftfeuchte der Raumluft am linken Chorgestühl
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden
- Lufttemperatur der Raumluft am linken Chorgestühl
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 64 Messpunkt 10

- Oberflächentemperatur der Südwand
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 65 Messpunkt 11

- Oberflächentemperatur unter einer Sitzfläche
des Chorgestühls
ca. 0,5 m Höhe über Fußboden

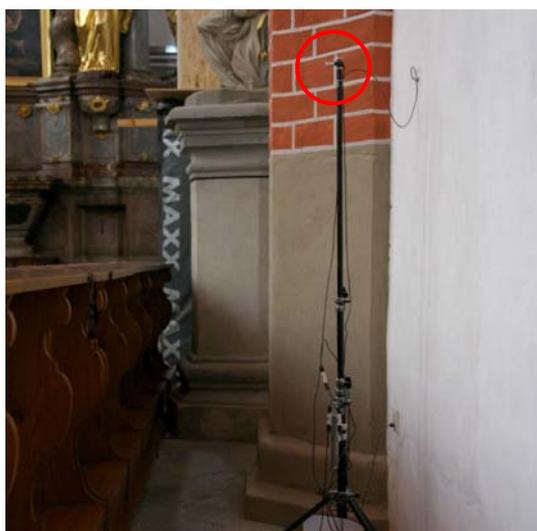


Abb. 66 Messpunkt 12

- relative Luftfeuchte der Raumluft am rechten
Chorgestühl (Südseite)
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden
- Lufttemperatur der Raumluft am rechten
Chorgestühl (Südseite)
ca. 1,5 m Höhe über Fußboden



Abb. 67 Messpunkt 13

- Oberflächentemperatur an einer Fensterscheibe eines Maßwerkfensters der Nordseite

13.2.2 Ergebnisse der raumklimatischen Untersuchung 2007 – 2008

Im Verlauf der Raumklimamessung vom 31.07.2007 bis zum 17.07.2008 konnte ein gesamter Jahreszyklus des Raumklimas aufgezeichnet werden. Innerhalb dieses Jahres schwankte die relative Luftfeuchte der Raumluft im Messbereich Gewölbepfeiler (Nahbereich linkes Chorgestühl) zwischen 45,8 % und 84,9 % rel.LF, der Mittelwert lag bei 72,2 % rel.LF. Die Lufttemperatur schwankte zwischen 8,5°C und 21,2°C, wobei hier der Mittelwert bei 14,1°C lag.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der raumklimatischen Untersuchung dargestellt. Die Diagramme befinden sich im Anschluss des Berichts.

In **Diagramm 1** wird das Außenklima (MP1, orange – Lufttemperatur; hellgrün – rel.LF) mit dem Raumklima (MP9, rot – Lufttemperatur; grün – rel.LF) der Klosterkirche (gemessen im Chorbereich) zusammen für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Offensichtlich wird, dass das Innenklima nur sehr gedämpft auf die jahreszeitlichen und die täglichen Schwankungen des Außenklimas reagiert. Besonders die derzeitige Erwärmung der Kirche in der Heizperiode sorgt für eine deutliche Stabilisierung des Raumklimas in der Heizperiode. Die Raumlufttemperatur fällt sehr selten unter die +10°C Marke und die relative Luftfeuchte schwankt um die 70 % rel.LF.

Die raumklimatische Situation am linken Chorgestühl im Bereich des Gewölbepfeilers (MP9) wird in **Diagramm 2** dargestellt. Die relative Luftfeuchte schwankt auch hier im Jahresverlauf zwischen 65 % und 80 % rel.LF. Einzelne stärkere Schwankungen können in der Untersuchungszeit den Baumaßnahmen zugeschrieben werden. Hier kam es an manchen Tagen zu einer längeren Öffnung der Türen, um Baumaterial transportieren zu können. Die Lufttemperatur (rote Kurve) und die Oberflächentemperatur des Gewölbepfeilers (lila Kurve) sind fast identisch. Die Fußbodentemperatur der Granitplatten (hellblaue Kurve) bleibt dagegen im Frühjahr bei einer Erwärmung der Raumluft gering kühler. Im Frühjahr konnte auf diesem kühleren Fußboden der Ausfall von Kondensat festgestellt werden. Im Diagramm wird diese Zeit durch eine rote Markierung hervorgehoben. Das langsame Erwärmen des Granitfußbodens kann mit seiner thermischen Trägheit erklärt werden.

Durch Besucherverkehr ausgelöste Kabelbrüche kam es zu einem Ausfall dieses Sensors, so dass hier nur teilweise der Jahreszyklus aufgenommen werden konnte.

Die Nordwand stellt die größte Wandfläche in der Klosterkirche dar, die als eine direkte Außenwand bezeichnet werden kann. In Diagramm 3 wird das Klima an dieser Nordwand aufgezeigt (MP5). Kurz nach Installierung der Messtechnik an diesem Messbereich erfolgte eine Einhausung dieses Wandbereiches um die dort angebrachten Grabplatten vor den Baustaub zu schützen. Die rote Linie markiert den Zeitpunkt des Abbaus der Einhausung.

Auch an diesem Messbereich kann für die relative Luftfeuchte (grüne Kurve) eine geringe Schwankungsbreite im Jahresverlauf festgestellt werden. Die Werte liegen hier zwischen ca.

65 % und 85 %. Starke Tagesschwankungen konnten nur vereinzelt gemessen werden. Die Wandoberflächentemperatur (blaue Kurve) zeigt deutlich kühlere Temperaturwerte als die der gemessenen Raumlufte (rote Kurve). Dieses thermische Verhalten der Außenwand kann über längere Zeiten im Jahr beobachtet werden. Die Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Raumlufte konnte mit bis zu 2 K gemessen werden. Bei der derzeitigen Temperierung der Klosterkirche stellt die Nordaußenwand die kühlfte Wandoberfläche dar.

Da die Südwand im unteren Kirchenschiff baulich eine Trennwand zum Kreuzgang und somit eine Innenwand darstellt, kommt es nicht wie an der Nordwand zu einer Abkühlung dieses Wandbereichs (MP12). Im **Diagramm 4** wird dies messtechnisch belegt. Die Oberflächentemperatur der Südwand (hellblaue Kurve) gleicht der der Raumlufte in diesem Messbereich (rote Kurve). In den Wochen der Abkühlung der Raumlufte im Herbst bleibt die Oberflächentemperatur der Südwand sogar etwas höher (rote Markierung im Diagramm) als die der Raumlufte. Die Abkühlung der Südwand nach Außen wird durch den angebauten Kreuzgang behindert. An diesem Messbereich erfolgte eine Oberflächentemperaturmessung an der Unterseite der Sitzflächen des beheizten Chorgestühls (lila Kurve). Im Diagramm ist eindeutig der Beginn der Heizperiode im November 2007 ablesbar (grüne Markierung). Abhängig von der Raumlufte werden Oberflächentemperaturen am Chorgestühl von ca. 12°C bis 15°C gemessen. Dies deutet auf die geringe Leistungsfähigkeit der bestehenden Fußbodenheizung im Messbereich hin.

In den folgenden Diagrammen werden bisher getroffene Aussagen ausführlicher beschrieben.

In **Diagramm 5** erfolgt eine Darstellung der Oberflächentemperaturen der Messachse: Nordwand (MP6) – Gewölbepfeiler (MP7) – Südwand (MP10). Deutlich hebt sich die Nordwand (rote Kurve) mit einer im gesamten Messzeitraum kühleren Wandoberfläche ab. Die Oberflächentemperaturen des Gewölbepfeilers (grüne Kurve) und der Südwand (blaue Kurve) gleichen sich im Untersuchungszeitraum bis auf wenige Wochen im November 2007 (rote Markierung). In diesen Wochen erfolgten Baumaßnahmen im Messbereich, so dass hier die Sensoren verdeckt werden mussten.

Mit den unterschiedlichen Raumlufte Temperaturen über die Raumhöhe im Kirchenschiff beschäftigt sich **Diagramm 6**. Gemessen wurde in folgenden Höhen über dem Fußboden: ca. 1,50 m (MP9, rote Kurve), ca. 10,0 m (MP2, blaue Kurve), ca. 17,4 m (MP3, grüne Kurve). Erkennbar wird, dass es in der Heizperiode zu keiner markanten Schichtung der Raumlufte Temperatur kommt. Dies ist auf die Luftbewegung zurückzuführen, die im Kirchenschiff in den Wintermonaten vorherrscht. Detaillierter wird darauf im Absatz 13.3 eingegangen. In den Sommermonaten zeigt sich eine stärkere Erwärmung der oberen Luftschichten ab 10,0 m Raumhöhe bis unter das Gewölbe. Dies ist auf die starke Erwärmung des Dachbereichs und der damit einhergehenden Erwärmung des gemauerten Gewölbes zu erklären. Bedingt durch die relativ leichte Bauart, kann das Gewölbe die gespeicherte Sommerwärme kaum messbar in die kühlere Jahreszeit hinein speichern.

Da an den Maßwerkfenstern deutliche Laufspuren von Kondenswasser sichtbar sind, erfolgte an einem dieser Fenster (MP13) die Bestimmung der Oberflächentemperatur, um eine Aussage über die Häufigkeit der Taupunktunterschreitung abgeben zu können. Im **Diagramm 7** erfolgt der Vergleich der Taupunkttemperatur der Raumlufte (MP2, lila Kurve) mit der Oberflächentemperatur einer Fensterfläche (MP13, blaue Kurve). Erkennbar ist, dass es in den Monaten Dezember bis Mai immer wieder zum Unterschreiten der Taupunkttemperatur der Raumlufte an dem Fensterglas gekommen ist (rote Markierung). In diesen Zeitabschnitten stellen die unbeheizten Maßwerkfenster die kältesten Oberflächen dar, und es kommt zu einem Tauwasserausfall an ihren Oberflächen.

Da wie im Diagramm 7 dargelegt vor allem in den Frühjahrsmonaten eine erhöhte Gefahr von Kondensatbildung an kühleren Oberflächen besteht, erfolgt in **Diagramm 8** ein Vergleich der absoluten Luftfeuchte in der Klosterkirche (MP2, grüne Kurve) mit der der Außenluft (MP1, rote Kurve). Deutlich wird, dass die absolute Luftfeuchte in der Klosterkirche im Messzeitraum eindeutig über der der Außenluft lag. Diese erhöhte absolute Luftfeuchte hat verschiedene Gründe. Zum einen durch die Gottesdienstbesucher aber auch durch feuchtes Wischen, Restfeuchte von den Malerarbeiten und anderes. Bei den Gottesdiensten am Sonntag kommen am Vormittag ca. 300 Personen über mehrere Stunden verteilt in der Kirche zusammen. Diese 300 Personen geben in etwa 12 l Wasser an den Kirchenraum ab. Bei den raumklimatischen Messungen konnte diese Feuchtezunahme belegt werden. Im **Diagramm 9** wird beispielhaft die Zeit

vom 02.05.2008 – 13.05.2008 vorgestellt. Erkennbar werden zwei Sonntage (rote Markierung) mit einer Zunahme der absoluten Luftfeuchte im Kirchenschiff (grüne Kurve) um etwa 1 g/m^3 Raumluft. Bei einem Gesamtvolumen der Kirche von ca. 11900 m^3 sind das ca. $11,9 \text{ l}$ Wasser. Ein Teil dieses Wassers wird an Wandflächen und Holzbauteilen absorbiert. Aber ein großer Teil dieses sich in der Raumluft befindenden Wassers schlägt sich als Kondenswasser an den Fensterflächen oder an anderen kalten Oberflächen, wie dem Gewölbe, nieder.

13.3 Messung von Luftströmung / Rauchversuche

13.3.1 Vorgehensweise und Messkonzept

Die Auswertung der Messung der Luftströmung im Nordschiff in der Klosterkirche St. Marienstern bezieht sich auf den Untersuchungszeitraum vom 18.12.2007 bis zum 11.03.2008. Zum Einsatz kam ein Datenlogger mit Messfühlern der Firma Ahlborn Messtechnik GmbH.

Die Messungen erfolgten in einem Messtakt von 15 Minuten. Der Standort der Behaglichkeitsmessung ist im Grundriss und Schnitt in Abb. 68 dargestellt.

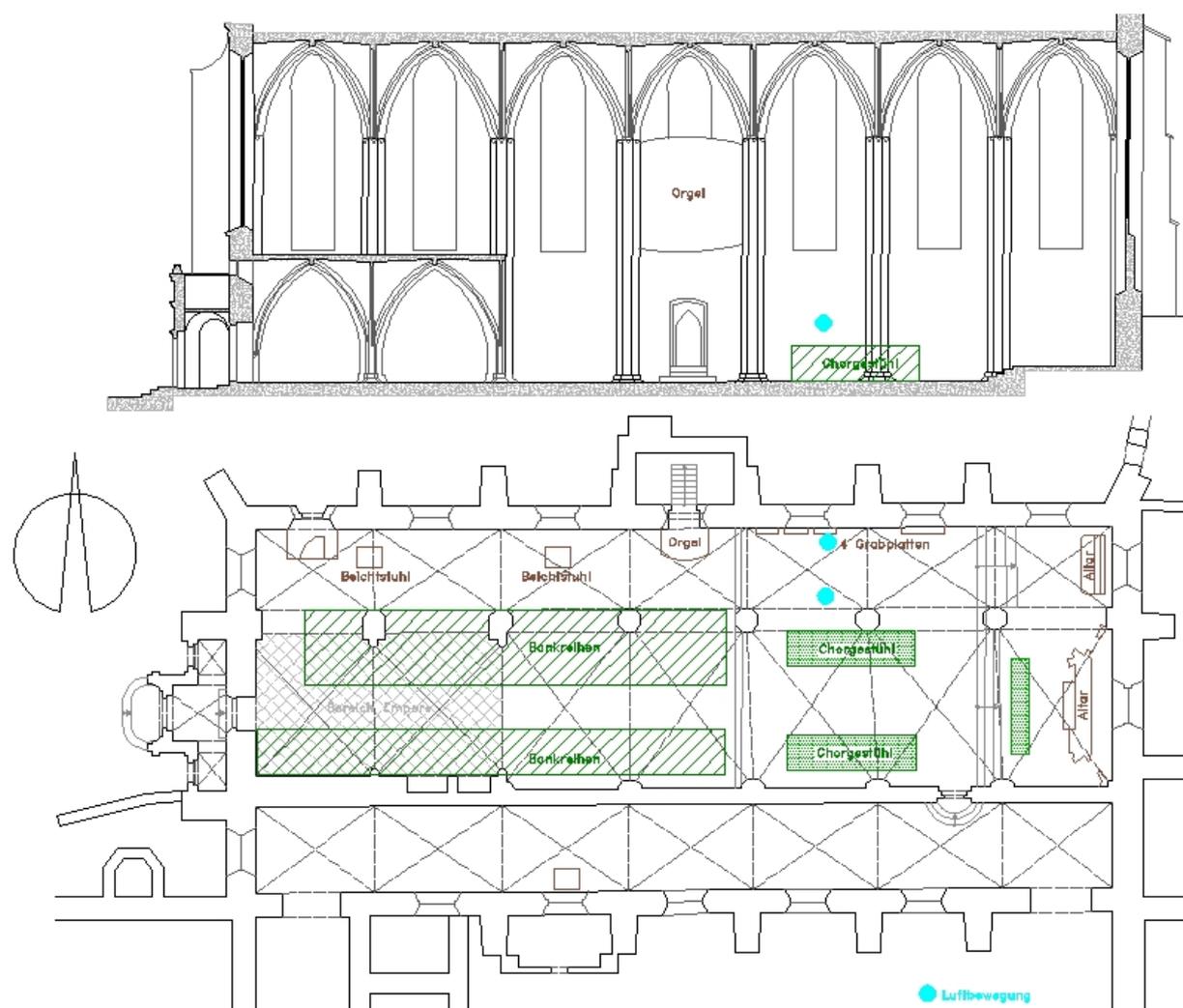


Abb. 68 Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit den Messpunkten Luftströmungsmessung

In Abb. 69 und Abb. 70 werden die Messpunkte der Luftströmungsmessung mit den dort gemessenen Messwerten vorgestellt.



Abb. 69 Luftströmungsmessung Nordwand

- Messung der Geschwindigkeit der Luftströmung unterhalb eines Nordfensters (gerichteter Sensor – Messung der Fallwinde)



Abb. 70 Luftströmungsmessung Gewölbepfeiler

- Messung der Geschwindigkeit der Luftströmung im Bereich des linken Chorgestühls (gerichteter Sensor – Messung der waagerechten Luftbewegung)

13.3.2 Ergebnisse der Luftströmungsmessungen

Im Verlauf der Luftströmungsmessungen vom 18.12.2007 bis zum 11.03.2008 konnten aufschlussreiche Messergebnisse gesammelt werden. So wurden Spitzengeschwindigkeiten der Fallwinde unterhalb der Nordfenster von 0,4 m/s gemessen. Schon Windgeschwindigkeiten von unter 0,1 m/s werden vom Menschen als unangenehme Zegerscheinungen wahrgenommen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Luftströmungsmessung im Bereich der Nordwand und des Chorgestühls dargestellt. Die Diagramme befinden sich im Anschluss des Berichts. In **Diagramm 10** wird die Luftbewegung der Fallwinde unter einem Nordfenster für den Untersuchungszeitraum vom 18.02.2008 bis zum 11.03.2008 dargestellt. Erkennbar sind die stabile Raumlufttemperatur (blaue Kurve), die Tagesschwankungen der Außenlufttemperatur (rote Kurve) und die Luftgeschwindigkeit unter dem Fenster (grüne Kurve). Deutlich wird, dass ein Zusammenhang zwischen zunehmender Luftbewegung und Differenz zwischen Außen- und Innenlufttemperatur besteht. Bei einer Annäherung von Außen- und Innenlufttemperatur kommt es zu einer Abschwächung der Fallwind (rote Markierung). Bei einer Vergrößerung der Temperaturdifferenz steigt jedoch die Luftbewegung an.

In **Diagramm 11** werden die Aussagen aus Diagramm 10 vertieft. Hier wurde die Zeitspanne von einer Woche gewählt um die täglichen Veränderungen hervorzuheben. Sehr deutlich fällt der Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz der Innen- und Außenlufttemperatur und der Stärke der Luftströmung unter dem Fenster auf. Beim Angleichen der beiden Lufttemperaturen kommt es zu einer Aufhebung der Fallwinde.

Die Messungen der horizontalen Luftströmungsgeschwindigkeit am linken Chorgestühl haben nicht solch übereinstimmende Ergebnisse erbracht. In diesem Bereich der Klosterkirche kommt es bereits zu merklichen Verwirbelungen der Raumluft, so dass ein gerichteter Luftströmungssensor keine eindeutigen Werte mehr erfassen kann. Im **Diagramm 12** werden die Ergebnisse dieser Messung am linken Chorgestühl aufgezeigt. Auffällig an dieser Messung sind drei Messzeiten an drei Sonntagen, an denen die Raumlufttemperatur leicht zunahm, gleichzeitig aber auch die Luftbewegung am Chorgestühl auf bis zu 0,3 m/s anstieg (rote Markierung). Der gemessene Temperaturanstieg kann mit der hohen Anzahl an Gottesdienstbesuchern (ca. 300 Personen in fünf Stunden) erklärt werden.

Um die Luftbewegung in der Klosterkirche zu visualisieren, erfolgten Rauchversuche mit unterschiedlichen Raucherzeugern. An mehreren Tagen erfolgten kleine Rauchversuche mit Rauchstäbchen (Abb. 71).



Abb. 71 Strömungsprüfröhrchen im Einsatz

Mit diesen Rauchstäbchen kann man an lokalen Bereichen wie zum Beispiel am Chorgestühl oder an Fenster- und Türleibungen die Luftbewegung sichtbar machen. Um eine Aussage über die Luftbewegungen in der gesamten Klosterkirche zu erhalten, erfolgten zwei Rauchversuche mit Nebelmaschinen. Dieser „Diskonebel“ verflüchtigt sich rückstandslos und man ist somit in der Lage, auch in denkmalpflegerisch sensiblen Objekten, die Luftbewegung eines Raumes zu dokumentieren. In der Klosterkirche wurden diese Rauchversuche mit einer Videokamera aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Aus allen Beobachtungen erfolgte die Erstellung der Grafik in Abb. 72 in der einige Beobachtungen beispielhaft eingezeichnet sind. Die roten Pfeile stehen für aufsteigende Warmluftbewegung und die blauen Pfeile für fallende Kaltluftbewegung. Es lässt sich feststellen, dass es eine große Luftbewegung in der Längsrichtung des Kirchenschiffs gibt. Diese wird initiiert von den Fallwinden der kalten Fenster in der Nord-West-Ecke und der aufsteigenden Warmluft, ausgehend von der offen verlegten Heiztrasse, der Fußbodenheizung vor dem Altar und dem Heizkörper hinter dem Altar. Die seitlichen abwärts oder aufwärts gerichteten Luftbewegungen sorgen vor allem an den Fensterflächen und den Heizkörpern für eine Verstärkung oder eine Abschwächung der Zugerscheinungen. Durch diese Verwirbelung der Raumluft kommt es in der Heizperiode zu keiner Schichtung der Raumlufttemperaturen im Kirchenschiff (siehe Diagramm 6).

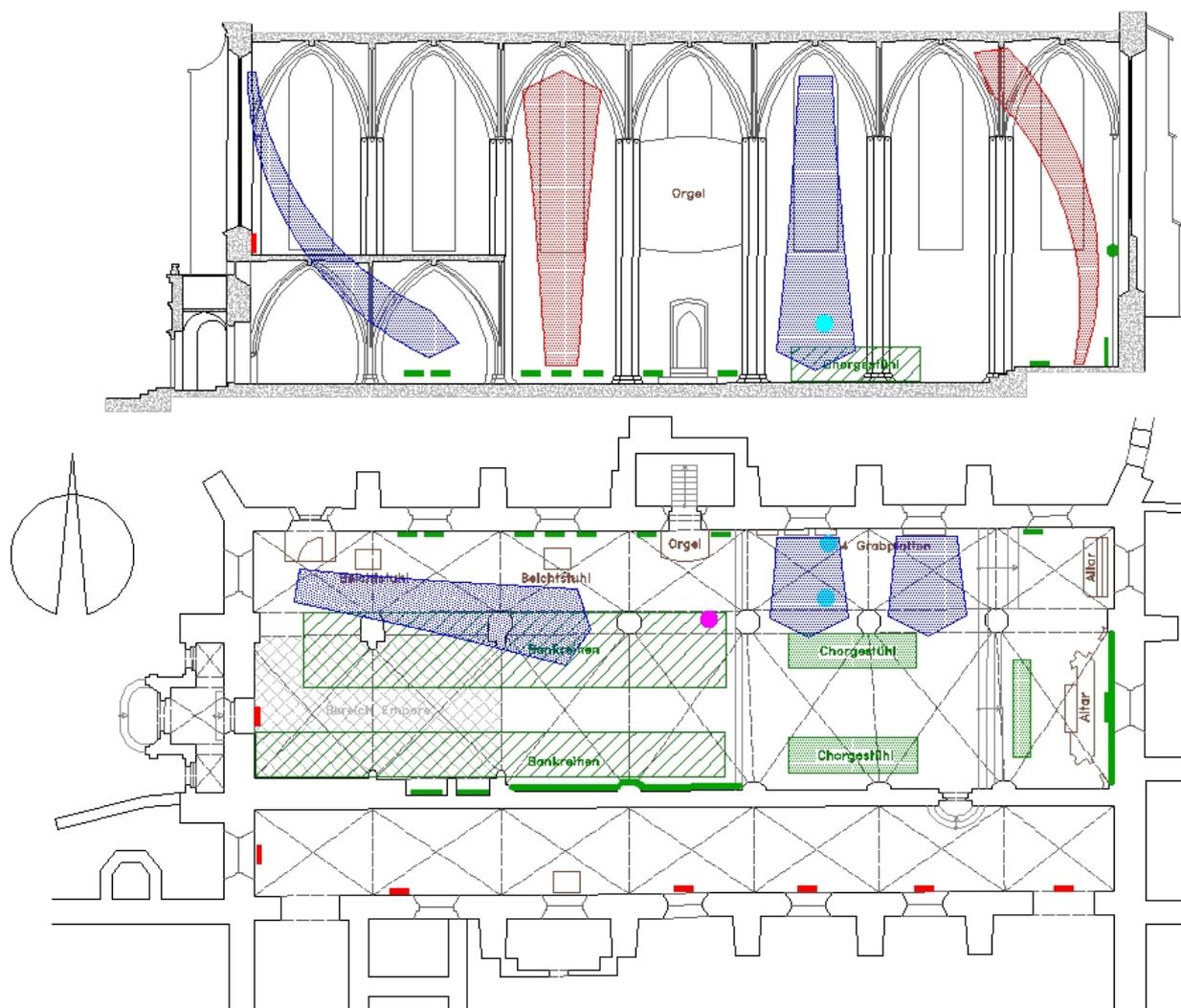


Abb. 72 visualisierte Luftbewegung in der Klosterkirche (vereinfacht dargestellt)
rote Pfeile: aufsteigende Warmluft; blauen Pfeile: abfallende Kaltluft

13.4 Behaglichkeitsmessungen

13.4.1 Vorgehensweise und Messkonzept

Im Verlauf der raumklimatischen Untersuchungen der Klosterkirche St. Marienstern konnten Behaglichkeitsmessungen im den Sitzbereichen der Nonnen und der Gottesdienstbesucher durchgeführt werden. Diese Messungen erfolgten in der Heizperiode vom 16.01.2008 bis zum 03.04.2008. In diesem Messzeitraum konnten an unterschiedlichen Messorten in der Klosterkirche die Werte der Behaglichkeit erfasst werden.

Die Messungen erfolgten in einem Messtakt von 15 Minuten. Zum Einsatz kam ein Datenlogger mit Messfühler der Firma Ahlborn Messtechnik GmbH. Der Standort der Behaglichkeitsmessung die im folgenden Absatz vorgestellt wird, ist im Grundriss in Abb. 73 dargestellt.

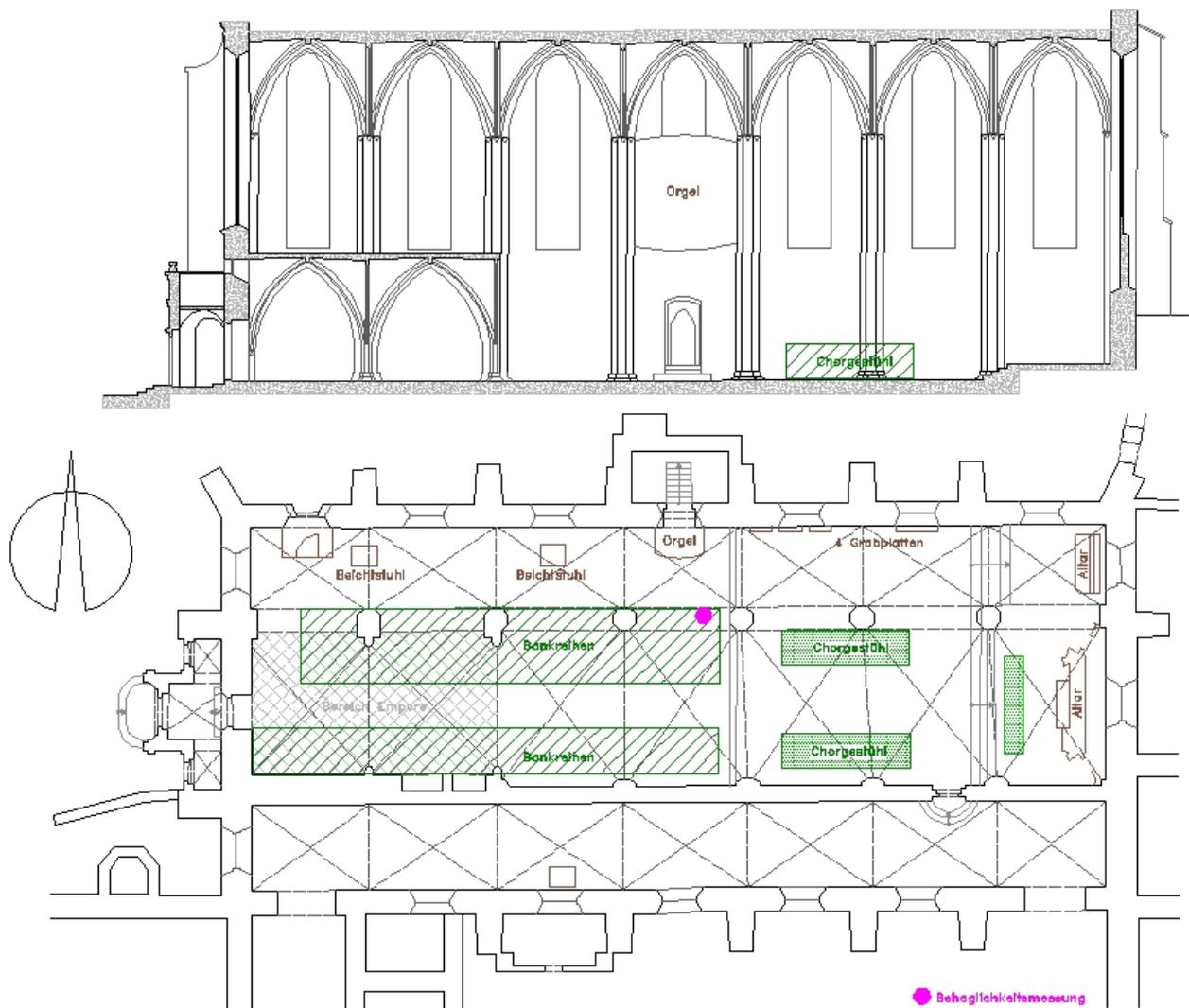


Abb. 73 Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit dem Messpunkt der Behaglichkeitsmessung

In Abb. 74 wird der Messpunkte der Behaglichkeitsmessung mit den dort gemessenen Messwerten vorgestellt.



Abb. 74 Behaglichkeitsmessung im Bereich der Bankreihen

- relative Luftfeuchte der Raumluft
- Lufttemperatur der Raumluft
- Luftgeschwindigkeit (ungerichtet)
- Strahlungstemperatur

13.4.2 Ergebnisse der Behaglichkeitsmessung

Da die Messmethode der Behaglichkeitsmessung vor allem für die Bewertung von Arbeitsplatzsituationen mit technischen Lüftungssystemen (Klimaanlagen) entwickelt worden ist, können die Messergebnisse aus einer grundtemperierten Kirche nur Anhaltspunkte liefern. Der Aufbau einer Behaglichkeitsmessstation ist in Abb. 75 dargestellt.



Abb. 75 Aufbau einer Behaglichkeitsmessstation:

- 1 – Globthermometer (Erfassung der Strahlungstemperatur der Umgebungswandflächen)
- 2 – Messfühler für relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur
- 3 – Messfühler für Luftströmungsgeschwindigkeit (ungerichtet)
- 4 – Datenlogger

Aus den gemessenen Werten, einem Isolationswert der Kleidung [clo] und für eine ausgewählte Art der Tätigkeit dem Aktivitätsgrad [met] werden dann die Werte PMV (predicted mean vote) und PPD (predicted percentage of dissatisfied) berechnet. Der PMV-Index gibt auf einer siebenstufigen Skala an, wie eine große Anzahl von Personen ein Raumklima durchschnittlich beurteilt.

len würde. Hierbei stellt ein PMV von null ein optimales Raumklima dar, negative Werte stehen für ein zu kaltes und positive Werte für ein zu warmes Raumklima. Aus dem PMV-Index kann der PPD-Wert ermittelt werden, der zwischen 5 % und 100 % liegen kann und den Prozentsatz der Unzufriedenen angibt. Als Beispiel wird in Abb. 76 ein Diagramm dargestellt, das den Zeitpunkt 9:45 Uhr am 24.02.2008 wiedergibt. Für die Berechnung wurde angenommen, dass die Besucher eine winterliche Kleidung tragen und eine sitzende Tätigkeit ausüben.

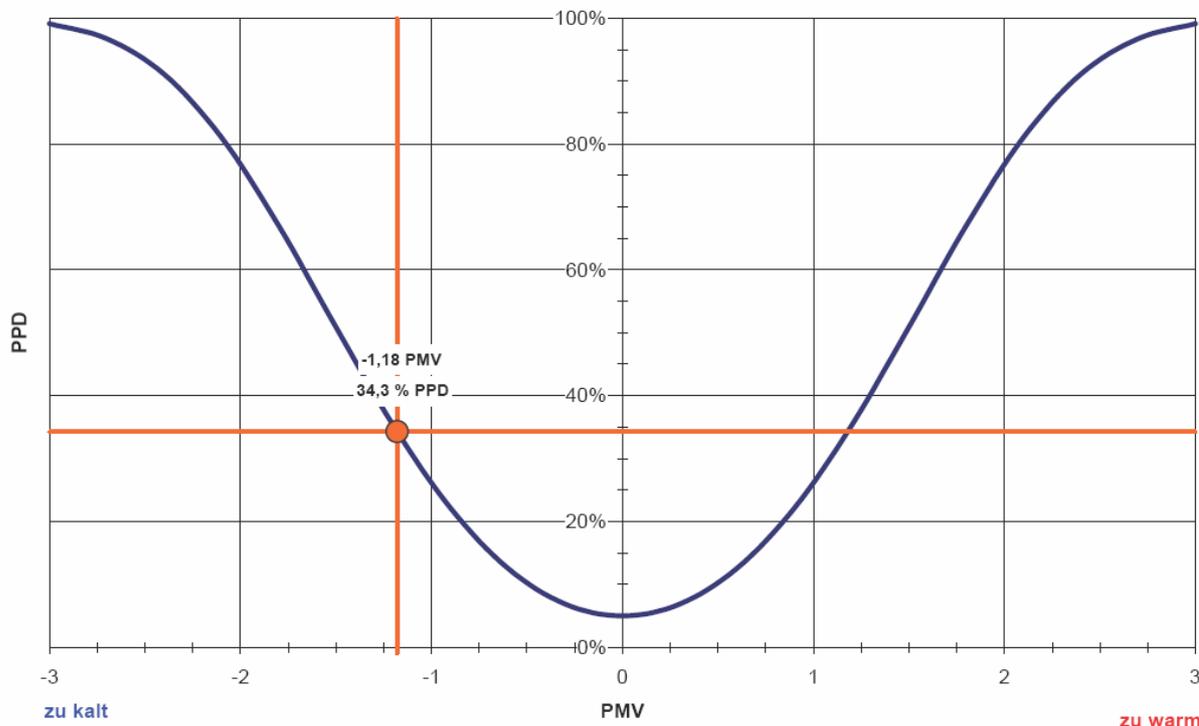


Abb. 76 Ergebnis der Behaglichkeitsmessung am 24.02.2008 um 9:45 Uhr

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass ca. 34 % der Besucher es als unangenehm in der Kirche empfinden. Dieses Ergebnis kann auf den gesamten Untersuchungszeitraum der Behaglichkeitsmessung übertragen werden. Eine große Anzahl an Besuchern (bis 50 %) findet es in der Kirche trotz einer Grundtemperierung als unbehaglich. Bei einer etwas leichteren Kleidung, zum Beispiel ohne Wintermäntel, steigt dieser Unbehaglichkeitswert auf fast 90 %. Als Ursachen für das Gefühl der Unbehaglichkeit kommen verschiedenen Faktoren zum tragen. Der markanteste Faktor ist in der Klosterkirche die Zugluft, die von den kalten Fensterflächen ausgeht. Auch die Abstrahlung kühlerer Oberflächentemperaturen der Außenwände spielt hier eine gewisse Rolle.

Im Folgenden werden weitere Ergebnisse aus der Behaglichkeitsmessung dargestellt. Das Diagramm befindet sich im Anschluss des Berichts.

In **Diagramm 13** wird noch einmal auf die Luftströmung in der Klosterkirche eingegangen. Im Diagramm ist deutlich die kontinuierliche Luftströmung (grüne Kurve) in der Untersuchungszeit zu erkennen. Da in der Behaglichkeitsmessstation die Luftgeschwindigkeit von einem ungerichteten Sensor gemessen wird, kann man hier die Auswirkung der Raumlufthverwirbelung erfassen (siehe Abschnitt 13.3). Die Gottesdienste am Sonntag den 24.02.2008 sind eindeutig ablesbar (blaue Markierung). Hier kam es durch die große Besuchermenge (ca. 300 Personen in fünf Stunden) zu einer ca. 2 K starken Erwärmung der Raumlufth. Dadurch stieg die Temperaturdifferenz zwischen Raumlufthtemperatur und Außenlufthtemperatur an, mit der Folge, dass die Luftbewegungen in den Bankreihen der Gottesdienstbesucher im Kirchenschiff stark zunahm. Die gemessenen Spitzen der Luftgeschwindigkeiten lagen bei ca. 0,4 m/s. Dies wird von den Besuchern trotz einer temperierten Kirche als sehr unangenehm empfunden.

13.5 Bestimmung der Luftwechselrate mit CO₂

13.5.1 Vorgehensweise und Messkonzept

Um Aussagen über die Luftwechselrate in der Klosterkirche St. Marienstern treffen zu können erfolgte die Messung der CO₂-Konzentration der Raumluft. Da CO₂ von den Besuchern eingebracht wird, es sich aber nicht in der Raumluft auflöst, ist es für diesen Versuch ein ideales Tracer - Gas. Die Messungen erfolgten im Zeitraum vom 31.07.2008 bis zum 20.06.2008.

Die Messungen erfolgten in einem Messtakt von 15 Minuten. Zum Einsatz kamen Datenlogger DK 500 mit Messfühlern der Firma Driesen + Kern. Der Standort der CO₂ - Messung ist im Grundriss in Abb. 77 dargestellt.

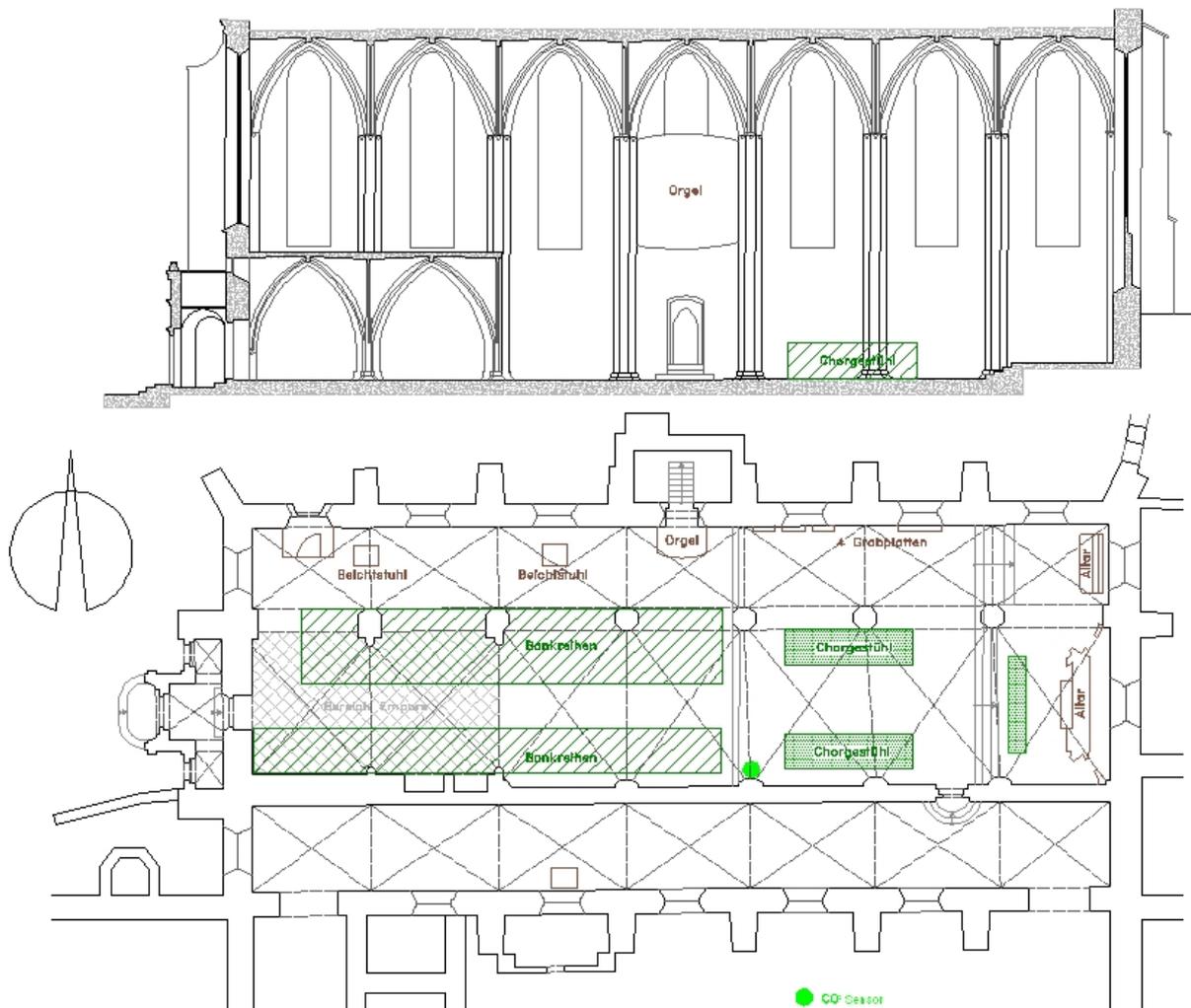


Abb. 77 Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit dem Messpunkt der CO₂ - Konzentration

In Abb. 78 wird der Messpunkt mit dem dort erfassten Messwerten vorgestellt.



Abb. 78 Messpunkt der CO₂ – Konzentration der Raumluft

- Messung der CO₂ Konzentration der Raumluft (Nähe Chorgestühl Südwand)
- relative Luftfeuchte der Raumluft
- Lufttemperatur der Raumluft

13.5.2 Ergebnisse der Messung der CO₂ - Konzentration

Die Messungen der CO₂ – Konzentration der Raumluft in der Klosterkirche St. Marienstern erbrachten verwertbare Informationen. Es konnten die Besuchermengen und die Luftwechselrate erfasst und bewertet werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Behaglichkeitsmessung in Diagrammform dargestellt. Die Diagramme befinden sich im Anschluss des Berichts.

In **Diagramm 14** erfolgt eine Gesamtdarstellung der CO₂ – Messung. Erkennbar werden die Sonntage mit den Gottesdiensten in der Klosterkirche an den starken Ausschlägen der CO₂ - Konzentration der Raumluft (blaue Kurve). Deutlich wird aber auch die schnelle Abnahme dieser Konzentration nach Beendigung einer der Veranstaltungen.

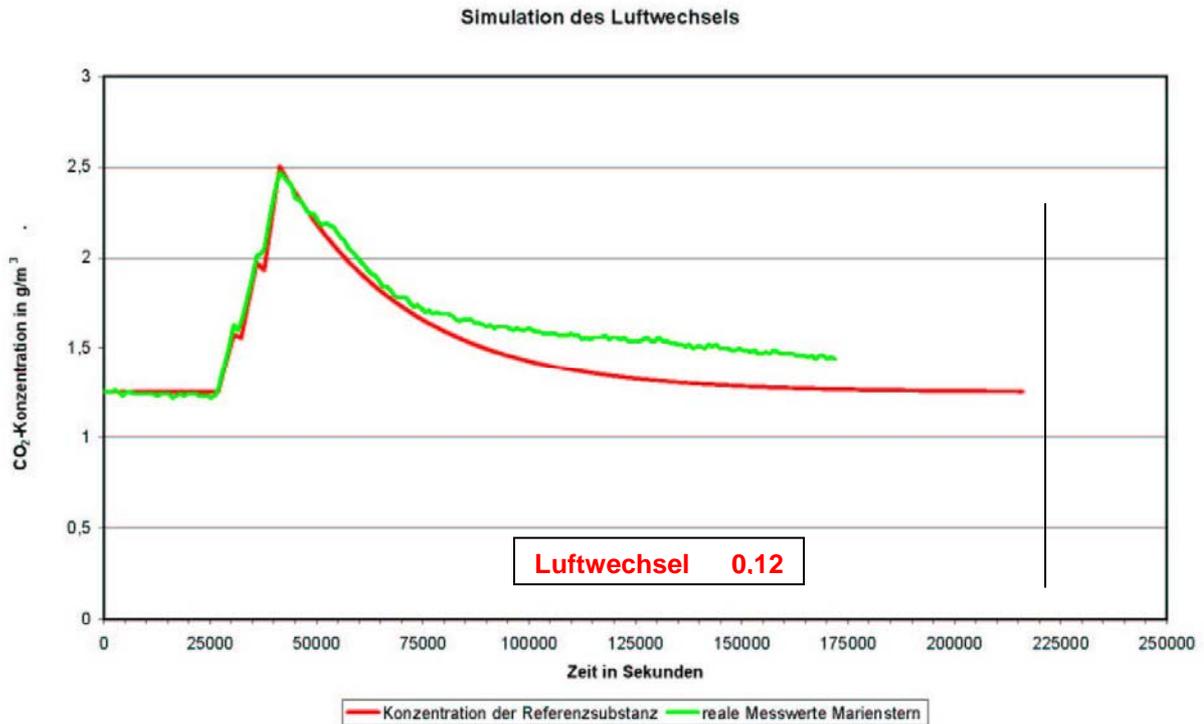
Aufgrund der Bauarbeiten im Kirchschiß bei der der Sensor abgedeckt werden musste und zweier Stromausfälle ist die Darstellung nicht vollständig.

Die Woche vom 20.03.2008 bis zum 26.03.2008 steht im Mittelpunkt des **Diagramm 15**. Hier wurde das Osterwochenende messtechnisch begleitet. Erkennbar wird, dass die große Anzahl an Besuchern sich deutlich anhand der steigenden CO₂ – Konzentration (blaue Kurve) in der Raumluft belegen lässt. Die CO₂ - Konzentration übersteigt am 23.03 (Ostersonntag) und am 24.03.2008 (Ostermontag) die Messgrenze des Sensors die bei 2000 ppm liegt.

Anhand der gemessenen CO₂ – Konzentration der Raumlufte hat Herr Kalisch vom IDK e.V. eine Näherungsrechnung für die Luftwechselrate eines Raums entwickelt. Für die Entwicklung dieser Rechnung erfolgte an einem Sonntag die Erfassung der Gottesdienstbesucher in der Klosterkirche. Anhand der erfassten Besuchermengen und des ermittelten Raumvolumens konnte die folgende Berechnung durchgeführt werden.

Mariensterne CO₂ - Konzentrationsänderung

am 27.01.2008, 00:00 Uhr bis 28.01.2008, 23:45 Uhr



angenommenes Raumvolumen: 11930 m³ (Quelle Th. Löther)

erfasste Personenzahl (Quelle Th. Löther)

27.01.2008 07:30 bis 08:30 Uhr 90 Personen

27.01.2008 09:00 bis 10:00 Uhr 125 Personen

27.01.2008 10:30 bis 11:30 Uhr 180 Personen

mit angenommener CO₂-Abgabe von 45 g/(h und Person)

Beginn der CO₂-Zunahme 27.01.2008 07:30 Uhr

Maximum der CO₂-Zunahme 27.01.2008 11.30 Uhr

angenommener Luftwechsel vom 27.03.2008 00:00 Uhr bis Simulationsende von **0,12 h⁻¹**

Aufgrund dieser Berechnung liegt eine Größe für das Luftwechselverhalten der Klosterkirche St. Marienstern vor. Damit muss bei weiteren Planungen nicht mit Abschätzungen oder Literaturangaben gearbeitet werden, sondern es ist möglich das tatsächliche Luftwechselverhalten eines Raumes zum Beispiel für die Auslegung einer Beheizung anzusetzen.

13.6 Fazit

Die durchgeführten raumklimatischen Untersuchungen haben zum einen gezeigt, dass der zurzeit bestehende raumklimatische Zustand geringe Schäden an der Ausstattung oder der Raumhülle hervorgerufen hat. Ausgenommen werden muss aber die Verschmutzung der Raumhülle durch Staubablagerungen. Messtechnisch belegt werden konnte der Einfluss der Besucher und der kalten Bauteiloberflächen wie Fenster oder Gewölbeunterseite auf die Stabilität des Raumklimas. Hier besteht vor allem bei der Luftbewegung durch Zugluft ein Verbesserungsbedarf. Dieser Bedarf muss bei einer Neukonzeption der Beheizung des Kirchenraums eine entscheidende Rolle spielen. So muss versucht werden die notwendige Wärme für die Nonnen und Besucher dort wirken zu lassen, wo sie benötigt wird. Dies bedeutet, die Wärme direkt dem Nutzer

oder dem Bauteil einer bauphysikalischen Schwachstelle zuzuführen. Vor allem die großen Fensterflächen auf der Nordseite müssen bei einer Neukonzeption wärmetechnisch berücksichtigt werden, da sonst die Zugerscheinungen auch bei einer geringeren Grundtemperierung des Kirchenraumes wieder auftreten werden. Die Fensterflächen sind aus Behaglichkeitssicht das schwächste Bauteil in der Klosterkirche.

Einer Absenkung der Grundtemperierung des Kirchenraumes auf ca. +8°C kann aus bauphysikalischer Sicht zugesprochen werden. Durch eine intelligente Lokalterperierung der Sitzbereiche für die Nonnen und Besucher kann hier Energie eingespart werden, ohne dass mit baulichen Schäden an der Klosterkirche und der Ausstattung zu rechnen ist. Trotzdem sollte auch Wärmeenergie den baulich exponierten Bauteilen wie den Fensterflächen und der Nordwand zugeführt werden, die wenn bauphysikalisch nötig, abgegeben werden kann.

13.7 IR-Thermographie

13.7.1 Methodik

Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes von 0,0 K (-273,15°C) senden elektromagnetische Strahlung aus. Bei der Infrarot-Strahlungstemperaturmessung, als welche die quantitative Infrarotthermographie auch bezeichnet wird, wird die Intensität dieser Strahlung bestimmt. Daraus kann die Temperatur des aussendenden Körpers berührungslos ermittelt werden. Infrarotstrahlung ist der Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich an der langwelligen Seite des sichtbaren Spektrums an das rote Licht bei einer Wellenlänge von ca. 760 nm anschließt und sich bis zu etwa 1 mm Wellenlänge erstreckt. Thermographiekameras arbeiten im so genannten "Thermischen Infrarot" üblicherweise bei 8 - 14 µm. Auch die hier verwendete VARIOSCAN 3021 ST von InfraTec arbeitet zwischen 8 - 12 µm Wellenlänge. Detektiert wird ausschließlich die Oberflächentemperatur des untersuchten Festkörpers. Diese wird von der Kamera zweidimensional hochauflösend bestimmt und von einer Software in einen Farbcode übertragen. Es wird in allen Abbildungen derselbe Farbcode verwendet, allerdings zwischen den Bildsequenzen die Skalierung den Verhältnissen so angepasst, dass der Betrachter ein sinnvolles Bild von dem Untersuchungsbild bekommt.

13.7.2 Klosterkirche Wände

Mit einer Infrarothermographiekamera wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Oberflächentemperaturen der Wandflächen in der Klosterkirche bestimmt (Abb. 79, Abb. 80). Dazu wurden bevorzugt Bereiche untersucht, die mit durch die Heizung in der Kirche beeinflusst waren.



Abb. 79 IR-Untersuchungen im Kirchenschiff



Abb. 80 IR-Untersuchungen am Chorgestühl



Abb. 81 Nordwand, Fenster im 3. Joch von Westen

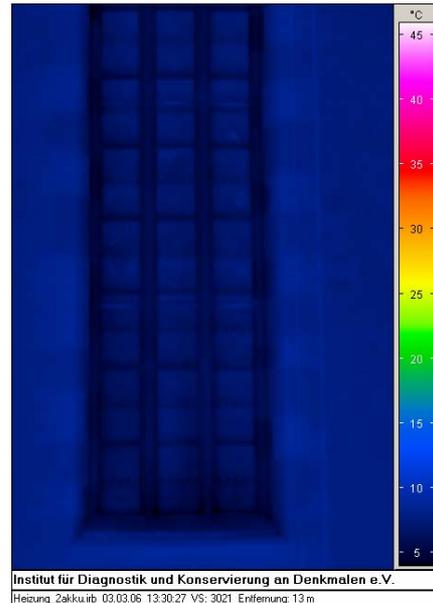


Abb. 82 IR-Aufnahme zu Abb. 81



Abb. 83 Nordwand, Heizkörper im 3. Joch von Westen

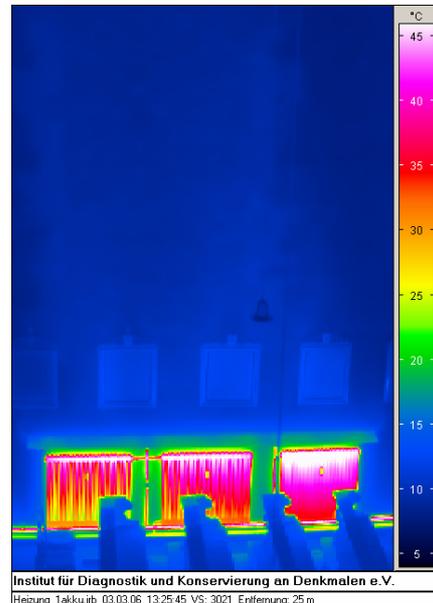


Abb. 84 IR-Aufnahme zu Abb. 83

Am 03.03.2006 wurden vom IDK sondierende Untersuchungen durchgeführt. In Abb. 81 bis Abb. 84 sind zwei Ausschnitte aus der Nordwand auf der Höhe des 3. Jochs von Westen so übereinander dargestellt, wie es der Situation vor Ort entspricht. Die Aufnahmen wurden von der Chorgasse aus erstellt. Die Heizkörper zeigen Temperaturen zwischen 33°C bis 42°C mit einer Höchsttemperatur von 48,5°C. Die Oberflächentemperatur der Wand beträgt etwa 7,6°C. Oberhalb des Abweiserbleches ist eine Wärmefahne an der Wand nachweisbar. Diese liegt bei etwa 12°C direkt oberhalb des Bleches und fällt etwas oberhalb der Bilder auf 10°C ab. Im Bereich des darüber liegenden Fensters werden an den Gewänden und Maßwerkteilen Temperaturen um die 5°C bis 6°C gemessen.



Abb. 85 Nordwand, 3. Joch, unterhalb Fenster

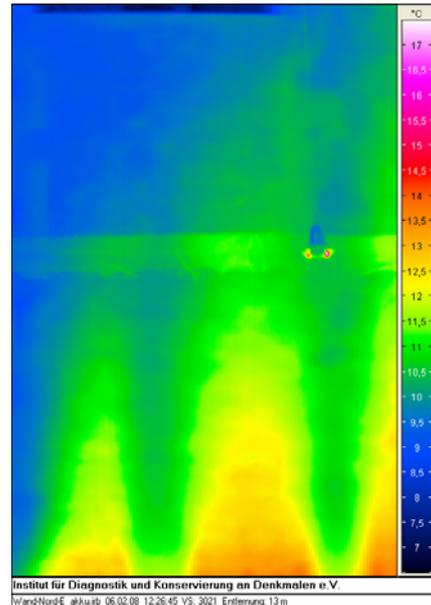


Abb. 86 IR-Aufnahme zu Abb. 85



Abb. 87 Nordwand, 3. Joch, oberhalb Heizkörpern

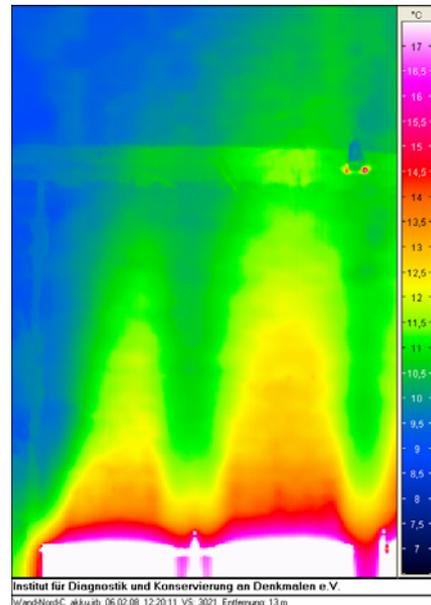


Abb. 88 IR-Aufnahme zu Abb. 87

An der Nordwand unterhalb des 3. Jochs von Westen wurden am 6. Februar 2008 weitere Untersuchungen durchgeführt (Abb. 85 bis Abb. 88). Hier lag der Beobachtungspunkt ebenerdig im Mittelschiff. Die Abweiserbleche über den Heizkörpern sind entfernt. An der Wand sind horizontale Beklebungen zwischen verschiedenen Malerabschnitten zu finden. Die Heizkörper haben eine Temperatur von etwa 33°C mit einer Höchsttemperatur von 35,03°C. Die Wandtemperatur liegt bei etwa 9°C. Über jedem Heizkörper ist eine deutliche Wärmefahne an der Wand nachweisbar. Diese fällt von etwa 15°C etwas oberhalb des Heizkörpers auf etwa 11°C unterhalb des auffälligen horizontalen Klebestreifens ab.



Abb. 89 Nordwand, 3. Joch von Osten, Epitaphe

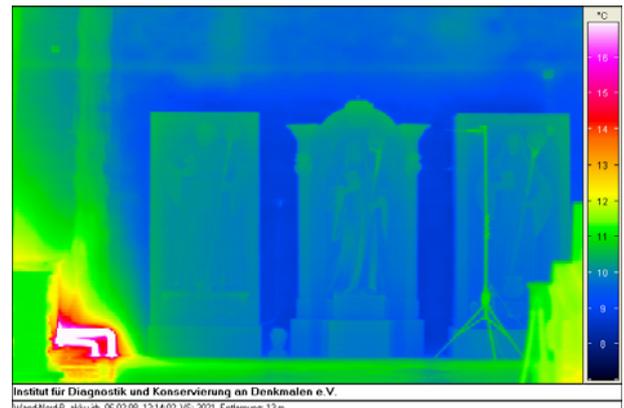


Abb. 90 IR-Aufnahme zu Abb. 89



Abb. 91 Südwand, rechts vom Chorgestühl



Abb. 92 IR-Aufnahme zu Abb. 91

Am 06.02.2008 wurden Vergleichsuntersuchungen an der Nordwand und an der Südwand durchgeführt. Die Nordwand (Abb. 89, Abb. 90) zeigt im untersuchten Bereich um die Epitaphe herum Temperaturen zwischen $8,8^{\circ}\text{C}$ und $10,2^{\circ}\text{C}$. Die im linken Bildausschnitt aus dem Boden kommenden Heizrohre versorgen die Heizkörper entlang der Nordwand. Das obere Rohr hat eine Temperatur von etwa 35°C . Am unteren Rücklaufrohr liegt die Temperatur bei etwa 25°C . An der Südwand wird eine Oberflächentemperatur von etwa $10,8^{\circ}\text{C}$ gemessen. Die höchste gemessene Temperatur an dem aus dem Kreuzgang an dieser Stelle ins Kirchenschiff geführten Heizrohr beträgt $29,8^{\circ}\text{C}$. Am unteren Rücklaufrohr liegt die Temperatur bei etwa 22°C . Der direkte Vergleich zeigt eine etwas unterschiedliche Oberflächentemperatur zwischen der Nord- und der Südwand. Das stimmt gut mit der Lage der jeweiligen Wände überein. Die Nordwand ist eine Außenwand, hingegen die Südwand grenzt das Kirchenschiff gegen das als Kreuzgang genutzte südliche Seitenschiff ab.

13.7.3 Gewölbe

Im gemessenen Winterfall sind die Gewölberippen wärmer als die Gewölbeflächen (Abb. 93 bis Abb. 95). Die Rippen haben genau wie die Pfeiler eine Temperatur von etwa 8°C. Das entspricht der Innenraumtemperatur zu dem Zeitpunkt. Die luftumspülten Pfeiler und Profile der Strebebögen spiegeln die Lufttemperatur in der Kirche wider. In diesem Zeitraum lagen die Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt und nachts deutlich darunter. Im Gewölbe wird an der Oberfläche der Innenseite eine Temperatur zwischen 6°C und 7°C gemessen. Der Temperaturübergang erfolgt oberhalb der Fenster gleitend in die Gewölbefläche. In den Aufnahmen Abb. 93 und Abb. 95 ist farblich gut kodiert zu erkennen, dass die Temperatur im Zwickel des Gewölbes oberhalb des Kämpfers deutlich höher ist, als in der darüber aufgehenden Gewölbefläche. In den Gewölbeflächen ist der Ziegelaufbau erkennbar. Dabei haben die Ziegelköpfe eine höhere Temperatur als die Fugenbereiche.

In Abb. 96 ist die Beheizung des Fußbodens im Chorgestühl und die Fußbodenbeheizung, die hinter dem Altar durch die Mensa geht gut zu erkennen.

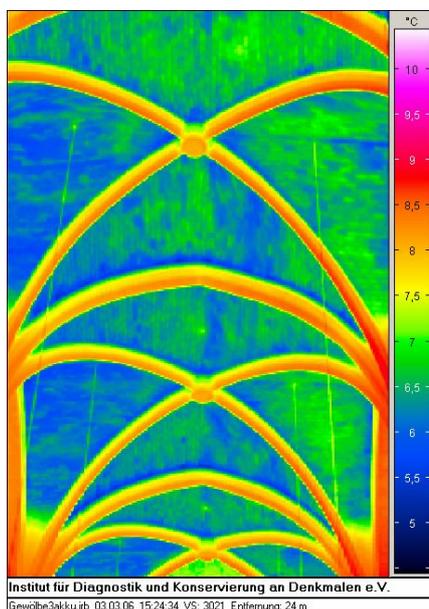


Abb. 93 Gewölbe

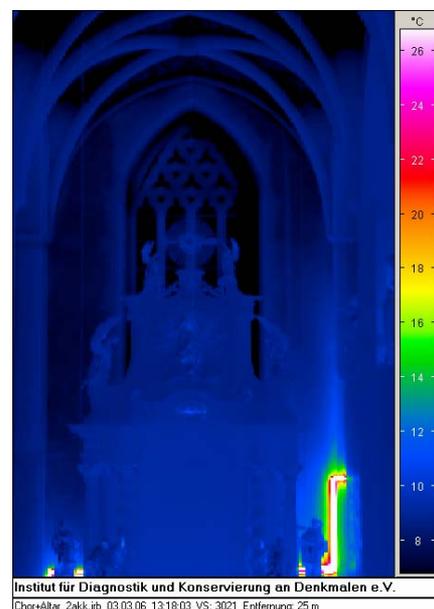


Abb. 94 Altar, von der Empore aus

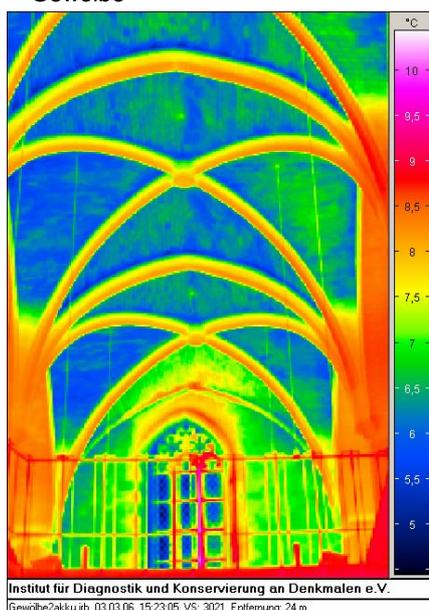


Abb. 95 Empore

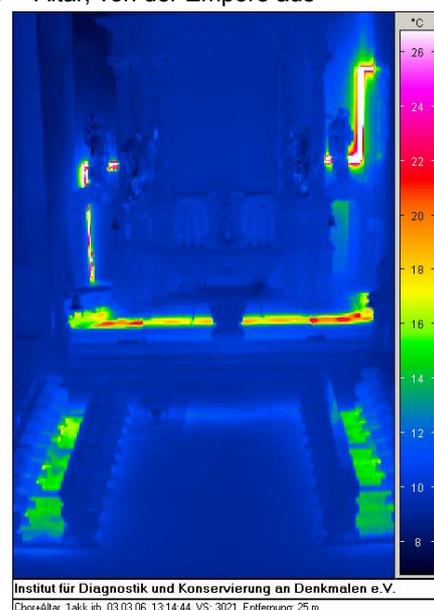


Abb. 96 Chor, von der Empore aus

13.7.4 Kreuzgang

Am 06.02.2008 wurde auch die Südwand der Klosterkirche von der Kreuzgangseite aus untersucht. Im unbeheizten Kreuzgang sind an dieser Stelle, wie an vielen weiteren laufenden Metern in fußbodennähe an der Wand starke Schäden zu beobachten. Das Fußbodenniveau des Kreuzgangs ist deutlich tiefer als das der Klosterkirche. In den IR-Aufnahmen (Abb. 97 bis Abb. 100) zeigen sich um unteren Bereich unterhalb der Bank tiefe Temperaturen von etwa 8,2°C. An der Wand nehmen die Temperaturen nach oben hin bis auf 8,8°C zu. Der Unterschied zur Oberflächentemperatur auf der anderen, der Kircheninnenseite, beträgt etwa 2°C.

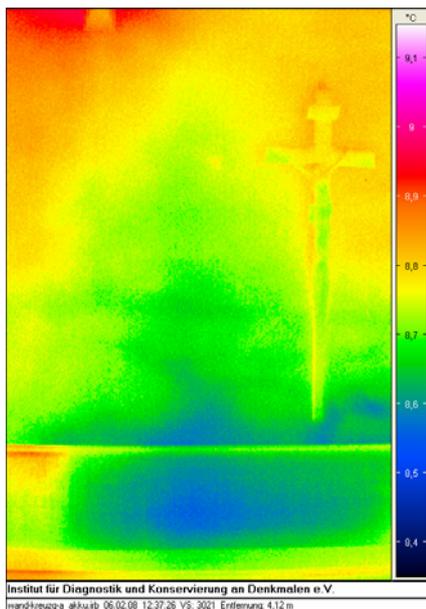


Abb. 97 Im Kreuzgang



Abb. 98 IR-Aufnahme zu Abb. 97

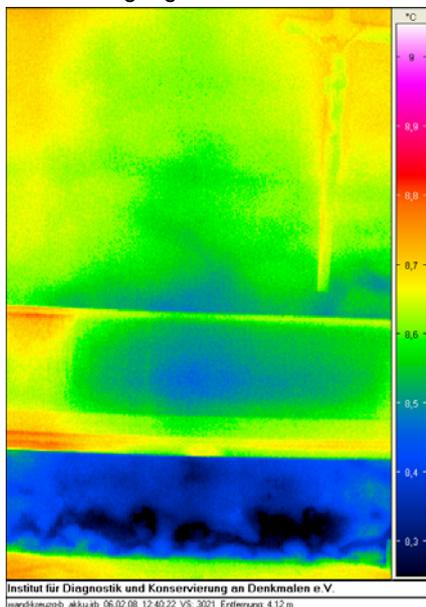


Abb. 99 Im Kreuzgang



Abb. 100 IR-Aufnahme zu Abb. 99

13.7.5 Untersuchungen am Chorgestühl

Die Behaglichkeitsmessungen wurden ergänzt durch IR-Untersuchungen an einem Simulationsobjekt. Aus Pappkartons wurde ein Dummy gebaut. Für eine gleichmäßige Oberfläche sorgte eine Lage aus Packpapier. Ein solcher Dummy hat gegenüber lebenden Personen bei der Untersuchung von Temperaturverteilungen verschiedene Vorteile. Eine Testperson hat eine körpereigene Temperatur von etwa 36°C. In Abhängigkeit der Lage des Körperteils sind unterschiedliche Oberflächentemperaturen beispielsweise an Händen oder Ohren im Vergleich zum Rumpf anzutreffen. Die Kleidung hat Oberflächentemperaturen, die einen intermediären Wert zwischen der Umgebung und dem Körper annehmen. Die Emissionsgrade der Kleidungsstücke können differieren.

Bei einem Dummy stellt sich die Situation einfacher dar. Papier hat einen Emissionsgrad nahe 1. Papier ist zwar ein schlechter Wärmeleiter, nimmt aber aufgrund seiner Dicke in einem für die durchgeführten Untersuchungen geringen Zeitraum die Umgebungstemperaturen an. In den folgenden Abbildungen ist wie im Vorigen auf der rechten Seite die IR-Aufnahme und links daneben ein lichtoptisches Foto der Situation dargestellt. Diese Darstellung erleichtert die Interpretation der Untersuchungsergebnisse.

Die Untersuchungsaufnahmen vom südlichen Chorgestühl sind in Abb. 101 bis Abb. 106 dargestellt. Das Holz des Chorgestühls hat eine Oberflächentemperatur von 11,5°C. Die von unten beheizten Fußbodenbretter zeigen Temperaturen von 12,7°C bis 14,0°C; Höchsttemperatur liegt bei 23,3°C. Am Dummy werden Temperaturen von 11,85°C und 12,01°C gemessen. Im Fußbereich werden auf dem Dummy Temperaturen von 12,28°C und 12,45°C erreicht.



Abb. 101 Foto zu Abb. 102, südliches Chorgestühl, von Westen

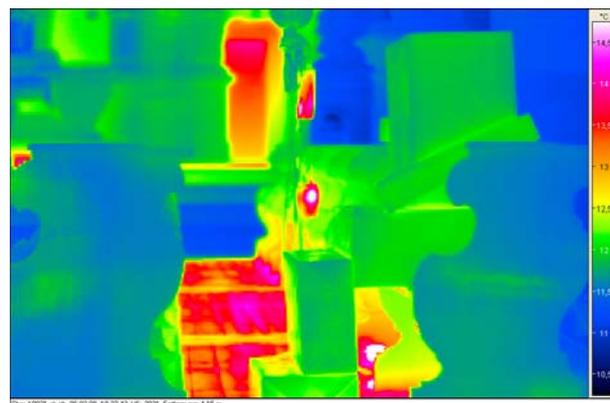


Abb. 102 Versuchsbeginn im südlichen Chorgestühl



Abb. 103 Foto zu Abb. 104, südliches Chorgestühl, von Westen

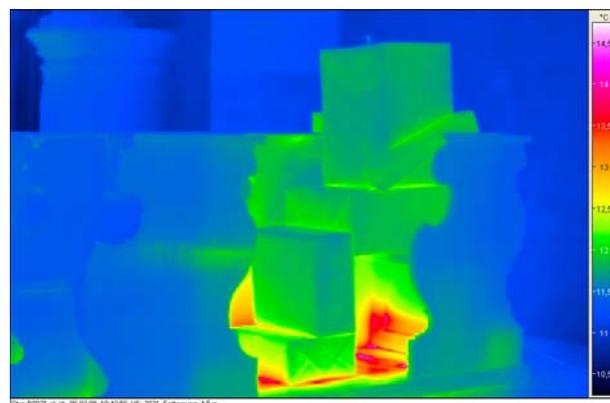


Abb. 104 Dummy im südlichen Chorgestühl



Abb. 105 Foto zu Abb. 106

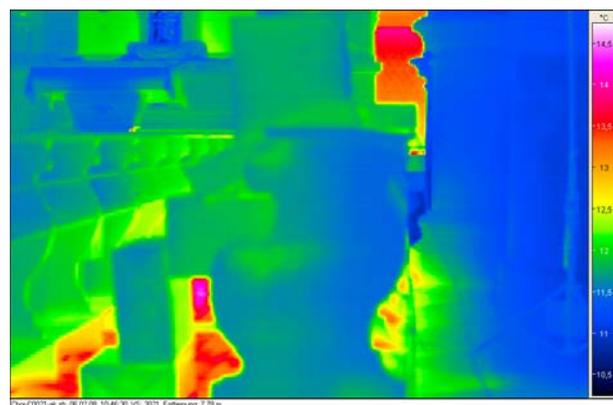


Abb. 106 südliches Chorgestühl, von Westen

Die Aufnahme­sequenz Abb. 107 bis Abb. 118 untersucht die Situation in nördlichen Chorgestühl. Die Fußbodenbretter zeigen hier Temperaturen von 13,7°C bis 14,5°C. Die Höchsttemperatur zu Beginn liegt bei 24,3°C, im Verlauf der Untersuchungen wird an einer Stelle 31,7°C nachgewiesen.



Abb. 107 Foto zu Abb. 108

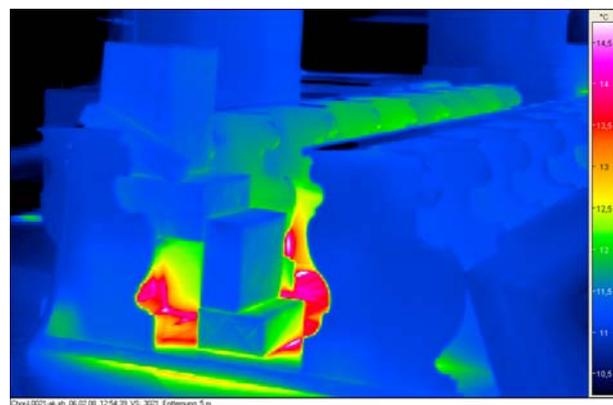


Abb. 108 nördliches Chorgestühl, von Westen



Abb. 109 Foto zu Abb. 110

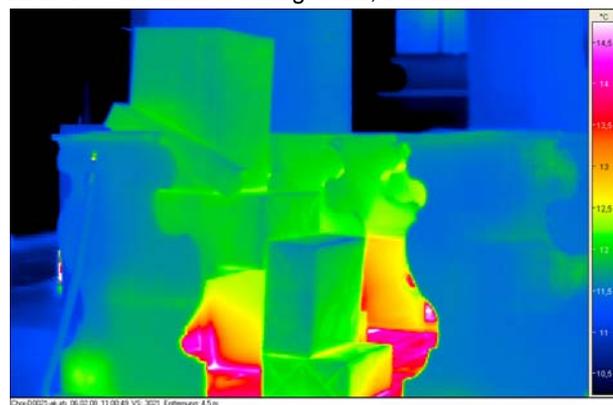


Abb. 110 nördliches Chorgestühl, von Westen



Abb. 111 Foto zu Abb. 112, nördliches Chorgestühl, von Westen

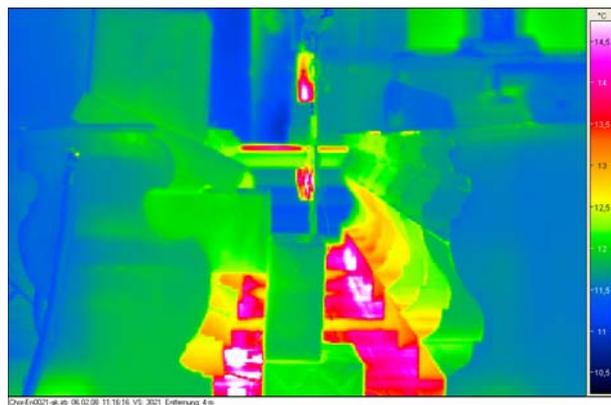


Abb. 112 ungleichmäßige Fußbodenheizung im Chorgestühl



Abb. 113 Foto zu Abb. 114, Detail

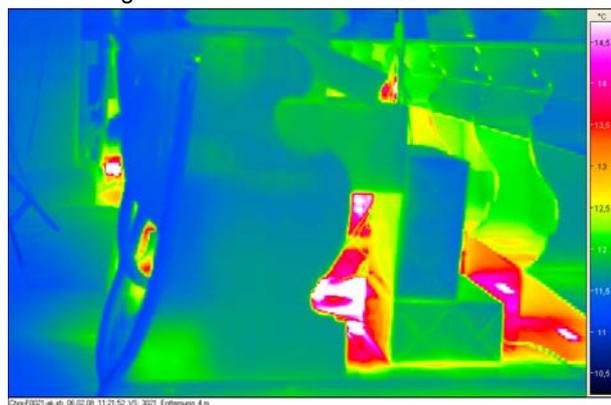


Abb. 114 Fußbereich am Dummy erwärmt



Abb. 115 Foto zu Abb. 116, nördliches Chorgestühl, von Westen

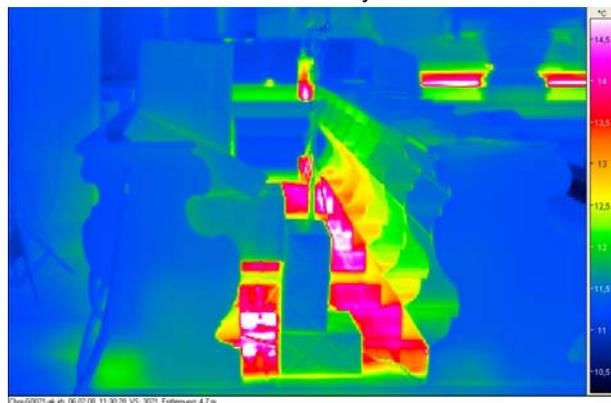


Abb. 116 Fußbodenheizung



Abb. 117 Foto zu Abb. 118, nördliches Chorgestühl, von Westen

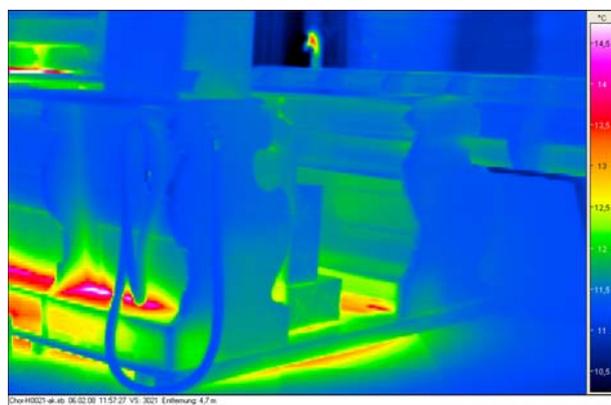


Abb. 118 Wärmeverluste in hinteren Bankteilen

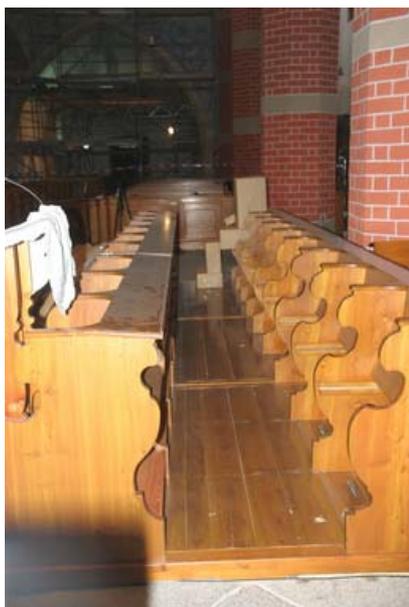


Abb. 119 Foto zu Abb. 122, nördl. Chorgestühl von Osten

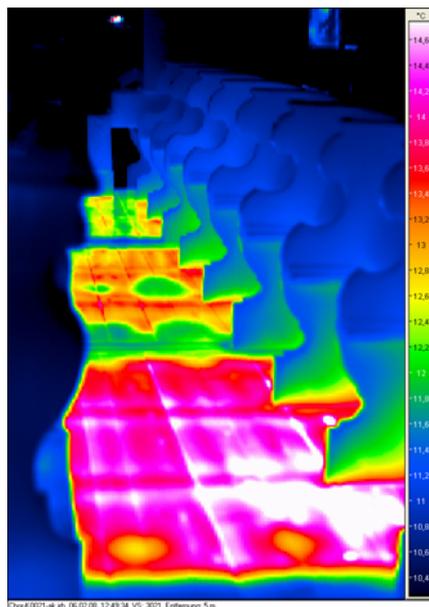


Abb. 120 Stark heterogene Wärmeverteilung an den Fußbodenfeldern des Chorgestühls



Abb. 121 Foto zu Abb. 122, Dummy im Musterumbau

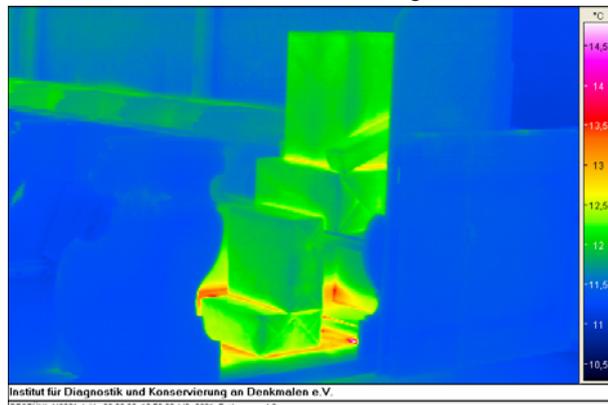


Abb. 122 Dummy im Musterumbau

14 Testbauten an dem Chorgestühl und den Bänken

14.1 Chorgestühl

Bis 1992 war das historische Gestühl auf dem Nonnenchor der Ort, an dem die Schwestern ihre täglichen Gebete verrichteten. Das 1992/3 gebaute „neue“, schlichte Gestühl steht im Chor. Das niedrige Gestühl ist zweigeteilt. An den Frontpartien sind weitere Sitze angebracht. Es bietet 18 Schwestern Platz und ermöglicht einen ungestörten Blickkontakt zwischen den Schwestern und der Gemeinde. Das Gestühl hat ein niedriges Podest, in dem einige Heizschleifen verdeckt eingebaut sind. Diese werden mit Warmwasser aus der Anlage, die durch den Kreuzgang geht versorgt. Durch regelmäßige Schlitze im Boden gelangt erwärmte Luft zu den Schwestern. Da dieser Bodenaufbau zu Beginn in der Erwärmungsphase sehr laut knarrte, wurden ein Teil der Segmente mit Bauschaum ausgeschäumt. Die Verteilung der Wärme im Chorgestühl ist daher sehr unregelmäßig.



Abb. 123 Gestühl auf der Nonnenempore



Abb. 124 Gestühl während der Baumaßnahme

14.2 Musterumbau

Aus den Untersuchungen und Nutzerbefragungen wurde deutlich, dass der Luftzug eine starke Beeinträchtigung der Behaglichkeit darstellt. Da das aktuelle Chorgestühl keine Rückwand und keine Seitentüren hat, kann der Luftzug ungehindert darüber hinweg und durchziehen. Es wurden Musterumbauten vorgenommen, den Luftzug am Chorgestühl einzudämmen. Mit Spanplatten wurde an Sitzreihen des Chorgestühls im Norden und Süden eine Rückwand installiert. Diese verhindert, dass der Luftzug von den Nordfenstern herabfallend auf den Rücken der im nördlichen Chorgestühl sitzenden Schwestern zieht. Der Erfolg dieser Maßnahme konnte über Rauchversuche belegt werden. Bei diesen zeigte sich dann auch, dass es einen starken Luftzug von den Seiten in das Chorgestühl hinein gibt. Diese Zugrichtung wird möglicherweise durch den Auftrieb im Bereich vor der Mensa angetrieben. Daher wurde der Spanplattenmusterumbau dann in einem weiteren Schritt durch Seitentüren ergänzt (Abb. 127, Abb. 128).



Abb. 125 Provisorischer Testumbau am Chorgestühl,
Nordseite



Abb. 126 Provisorischer Testumbau am Chorgestühl,
Südseite



Abb. 127 Provisorischer Testumbau am Chorgestühl,
Nordseite, mit Seitentür



Abb. 128 Provisorischer Testumbau am Chorgestühl,
Südseite, mit Seitentür

14.3 Visualisierung

In der Folge wurde die Idee weiter verfolgt und eine fotografische Visualisierung erarbeitet. Mehrere unterschiedliche Möglichkeiten wurden zur Darstellung gebracht. Abb. 129 zeigt das Chorgestühl leicht erhöht auf einem Podest, in dem eine Fußbodenheizung untergebracht werden kann. Als Rückwand und Tür wird eine transparente oder halbtransparente Schicht vorgeschlagen. Abb. 130 visualisiert einen Umbau aus Holz. Dieser umfasst wie der Spanplattenmusterumbau auch einen „Deckel“, in dem Lichtquellen oder auch weitere Wärmequellen untergebracht werden können. Als weiterer Vorschlag wird eine mobile Lösung empfohlen. Die windabweisende Rückwand kann auch aus einem Vorhang realisiert werden. Dieser kann auf einer ansprechend gestalteten Aufhängung im rückwärtigen Teil des Chorgestühls angebracht werden. So lassen sich die Kaltluftströme, die sich im Winter ausbilden, zu dieser Jahreszeit aus dem Rücken der Schwestern abweisen. Für die Seitentüren am Chorgestühl, die auch bei dieser Lösung bestehen bleiben, sollte dennoch eine stabile Lösung gesucht werden. Auch diese kann so gestaltet sein, dass sie leicht anzubringen und abzunehmen ist.



Abb. 129 Visualisierung eines Umbaus am Chorgestühl mit (halb-)transparenten Material (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)



Abb. 130 Visualisierung eines Umbaus am Chorgestühl mit Holz (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)

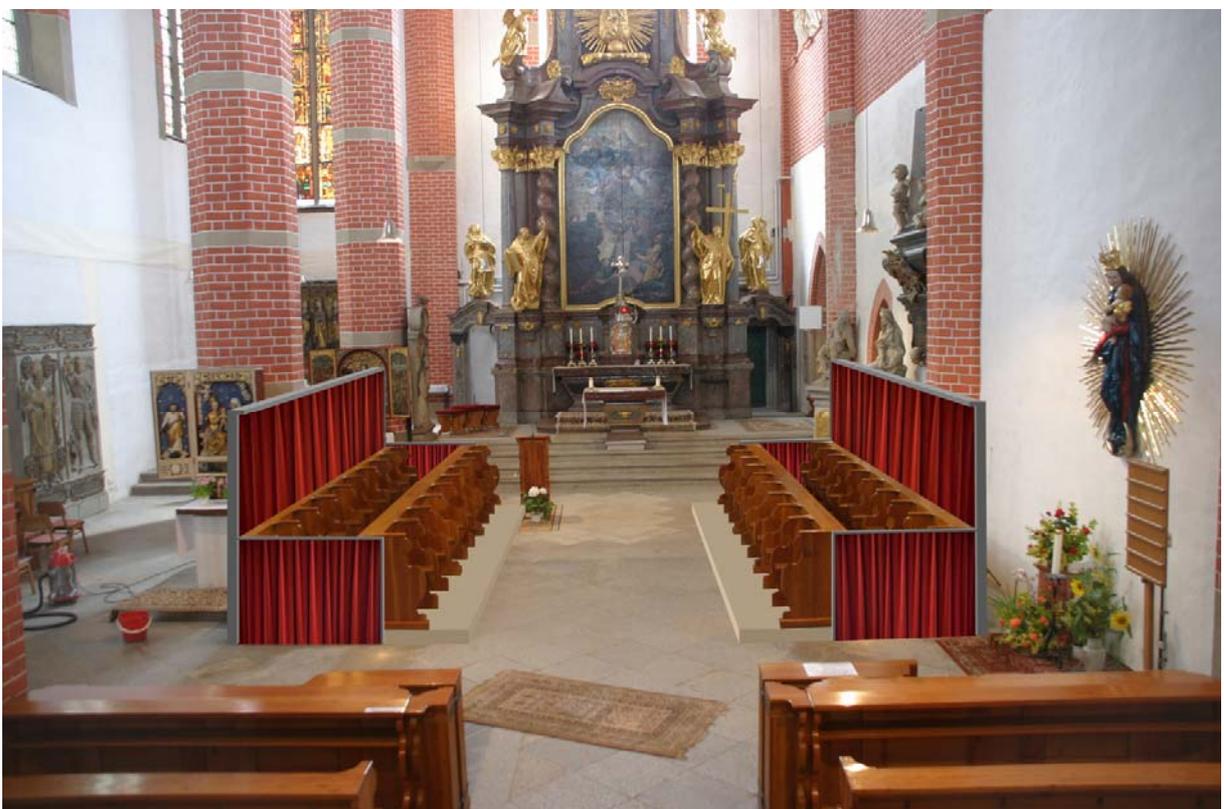


Abb. 131 Visualisierung einer mobilen Vorhangrückwand (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)



Abb. 132 Visualisierung einer mobilen Rückwand mit Stoffbespannung (Bildbearbeitung: C. Zeh, LfDS)

14.4 Musterbank

Die Musterbank wurde von Herrn J. Weißflog im Rahmen seines Ingenieurpraktikums am IDK gebaut und auch alle damit zusammenhängenden Arbeiten durchgeführt.

In der Klosterkirche befinden sich insgesamt neunundvierzig Kirchenbänke die zwischen fünf verschiedenen Längen variieren. Im Mittelschiff sind es achtzehn zu 3,81 m, vier zu 2,36 m und eine zu 2,84 m. Im Südschiff befinden sich zehn zu 2,84 m, zwölf zu 2,12 m und vier zu 1,79 m. Die unterschiedlichen Längen sind ergeben aus konstruktiven Gründen. An Säulen und Mauervorsprüngen im Kirchenschiff wurden kürzere Bänke eingestellt.

Zur Untersuchung und Bewertung zweier grundverschiedener Bankheizsysteme wurde nach den Maßen des Gemeindegestühls in der Klosterkirche St. Marienstern eine Musterbank angefertigt. Die zwei Bankreihen von 1,60 m Länge stehen auf einem 9 cm hohen Podest (Abb. 133, Abb. 134). Das Gestühl ist aus zusammengeleimten, gehobelten und geschliffenen Fichtenbohlen, -brettern hergestellt. Die einzelnen Teile wurden über Nut- und Schraubverbindungen zusammengefügt. Es wurde eine elektrische Sitzkissenheizung (Abb. 135) und ein Warmwasserheizsystem (Abb. 136) zum Test ausgewählt. Wobei das eine System eine elektronische Sitzkissenheizung (Abb. 137) ist, die auf 24 Volt basiert. Die Heizelemente für Rücken- und Sitzfläche wurden von der Firma Candor aus Leipzig angefertigt. Das Rückenelement hat eine Leistung von 70W/m das Sitzelement eine von 60W/m, beide haben eine Gesamtleistung von 156W und wurden mit doppelseitigem Klebeband an der Bank befestigt.



Abb. 133 Musterbank



Abb. 134 Musterbank



Abb. 135 Musterbank mit Sitzheizung



Abb. 136 Musterbank

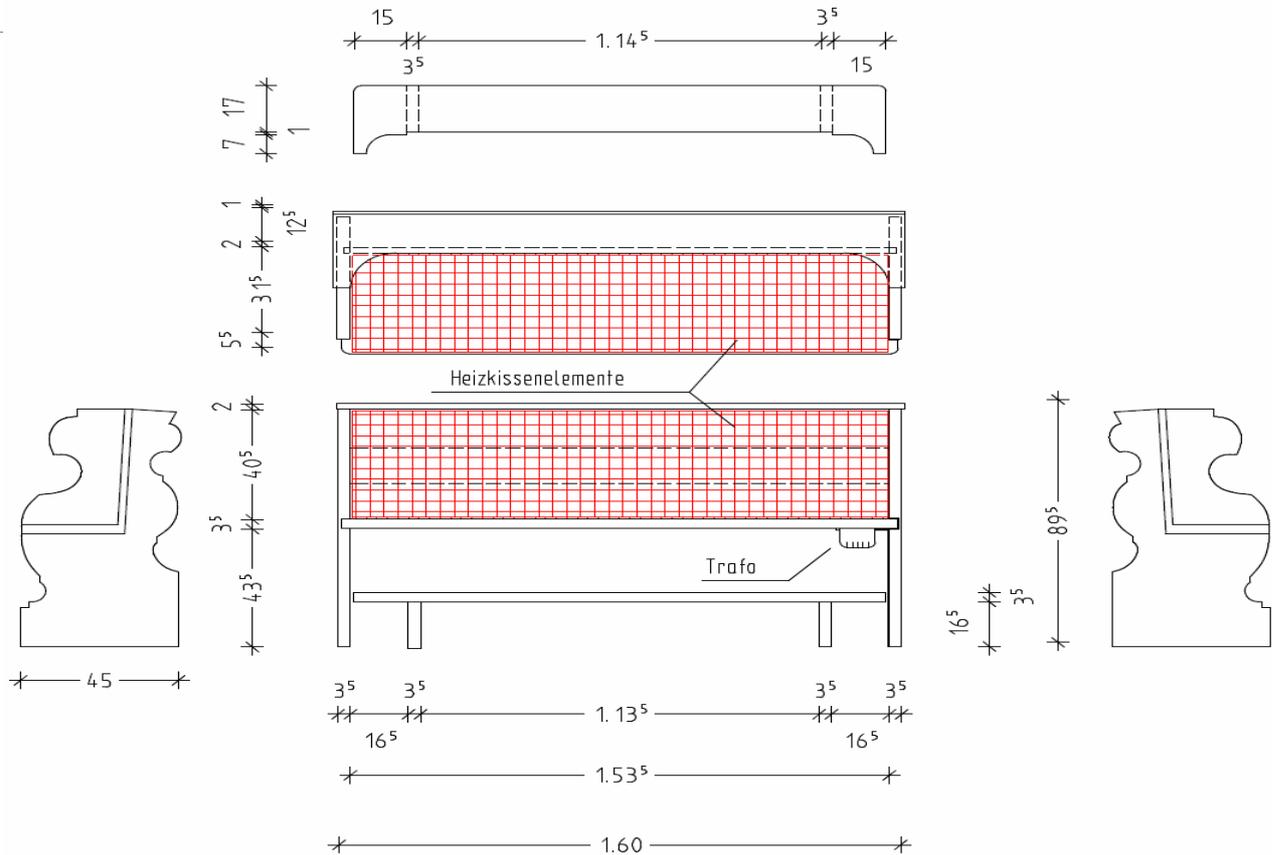


Abb. 137 unmaßstäbliche Zeichnung vom System „CANDOR“



Abb. 138 Trafo unter der Musterbank

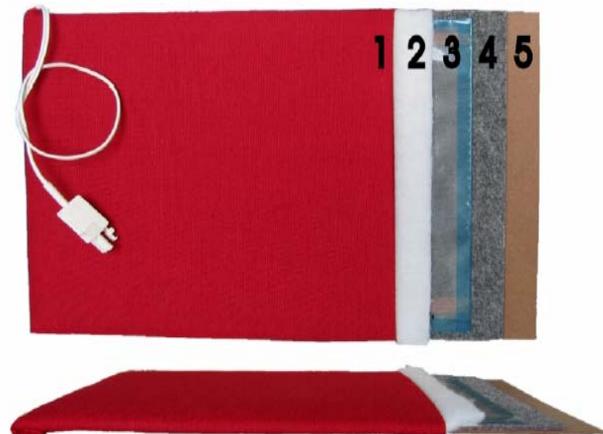


Abb. 139 Aufbau der Heizelemente Quelle: Candor-Prospekt

Der Aufbau (Abb. 139) der Heizelemente besteht aus einem Möbelstoff (1), Polsterung(2), Heizfolie(3), einer thermischen Isolierung (4) und einer Rückplatte (5). Über ein Trafo 320 VA/23-25 VAC (Abb. 138) wird die Stromversorgung gewährleistet. Unter die zweite Bank (Abb. 140) wurde ein Warmwasserheizsystem mit externem Kreislauf von der Firma Scholze aus Räckelwitz installiert. Hierfür wird eine speziell entwickelte und hergestellte Heizplatte der Firma Bretschneider aus Scheibenberg verwendet. Der Heizkreislauf besteht aus der genannten Heizplatte einer Heizpatrone und einer Pumpe. Die Heizplatte hat eine maximale Leistung von 240W/lfm eine Breite von 250 mm, Höhe von 30 mm und eine maximale Druckbelastung von 4 bar. Der Abstand zwischen Sitzfläche und Heizplatte beträgt ca. 25mm.

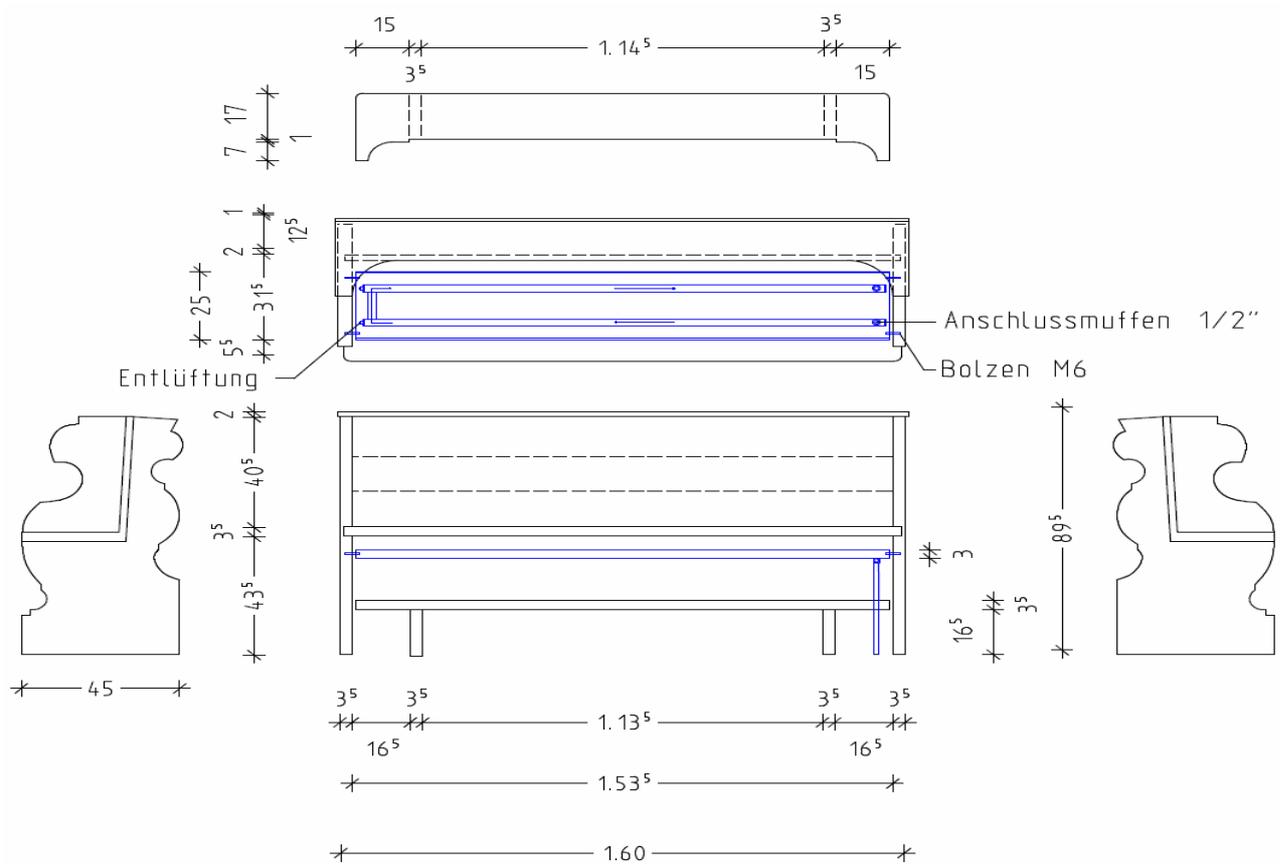


Abb. 140 unmaßstäbliche Zeichnung vom System „BRETSCHNEIDER“

Tab. 2 Ausgewählte Bankheizsysteme

Hersteller:	Candor	Bretschneider	Havener:
System:	Sitzkissenheizung	Warmwasser	Sitzkissenheizung
	Kosten: €	Kosten: €	Kosten: €
Chorgestühl+Heizteppich:	/		10270,20
Sitzfläche:	15390,21	21768,90	21768,79
Rückenlehne:	17287,45	/	/
Steuerung:	2022,78	305,00	1759,10
Elektro-Installation:	ca. 3000,00	/	ca. 3000,00
Summe:	37700,44	24473,90	36798,09
Heizkosten pro Std. nur Sitzkissen	1,85	Abhängig vom	0,6 (bei 30% Auslastung)
Anschlusswert Sitzkissen (in kW)	8,31	240W/lfm max.	10,11 (3kW bei 30% Auslastung)
Anschlusswert gesm. (in kW)	18,005	32,775	14,511
Heizkosten pro Jahr bei 400 Std.(nur Sitzkissen)	740,00	/	808,80(bei 30% 240)
Heizkosten über alles p a bei 400 Std.	1640,00	/	1160,88(bei 30% 348,26)

Im Zusammenhang mit der Anfertigung der Musterbank wurden drei Angebote (Tab. 2) für die Klosterkirche eingeholt und verglichen. Zwei der Angebote beziehen sich auf ein Sitzkissenheizsystem und das dritte auf ein Warmwasser geführte Bankheizung.

14.5 Umfrage

Zu der Befragung wurde ein kleiner Fragenkatalog erstellt der Fragen zur Einbauzeit, Nutzungsdauer, Behaglichkeit, Kosten, Verschleiß, Verbrauch und Wartung der Heizsysteme beinhaltet. Die Befragung erfolgte telefonisch mit den Pfarren und Gemeindevorstehern der ausgewählten Reverenzobjekte der beiden Heizsysteme. Unter den Objekten befanden sich Kirchen aus Rüsseina, Weida, Neundorf, Glauchau und Rudolstadt. Hier konnte durchaus eine positive Resonanz über Behaglichkeit, Verbrauch und Wärmeverteilung festgehalten werden. Um ein Grundtemperatur zu erzielen wurde bei den Kirchen die mit der Sitzkissenheizung ausgestattet sind ein zusätzliches Heizsystem verwendet. Von einigen Kirchbesuchen wurden die Sitzkissen als „zu warm“ empfunden andere wiederum empfanden es als sehr angenehm. Bei den Heizkörpern der Firma Bretschneider konnte eine gute Resonanz über ein hohes Maß an Qualität und Wärmeeffektivität aufgenommen werden. Es konnten nicht immer alle Fragen beantwortet werden da es meist an der Kundigkeit der einzelnen Person mangelte. So sind die Ergebnisse subjektiv und tragen nur im geringen Maße zur Entscheidung über ein Heizsystem bei.

Kontaktdaten:

Candor GmbH
Maximilianallee 25

04129 Leipzig

Tel.: 0341/9098690
Fax: 0341/9098691
E-Mail: zentrale@candor-gmbh.de
Web: www.candor-gmbh.de

P.R. Havener Kirchenbankpolster

66715 Saarlouis

Tel.: 06831/85239
Fax: 06831/86526
Web: www.kirchenbankpolster.de
E-Mail: info@havener.de

Scholz Florian Klempner- Installateurmeister
Mühlweg 8

01920 Räckelwitz

Tel.: 035796/96355
Web: www.mon.de/dd/florianscholze

Bertschneider Heiztechnik
Gewerbegebiet am Bahnhof 4

09481 Scheibenberg

Tel.: +49 (0) 37349 13571
Fax: +49 (0) 37349 13572
E-Mail: info@bretschneider-heiztechnik.de
Web: www.bretschneider-heiztechnik.de

15 Innenklimasimulationen

Die Computersimulationen des Innenklimas zur Bestimmung des Heizungssystems wurden vom Projektpartner Institut für Bauklimatik, Dipl.-Ing. Uwe Meinhold und Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roloff an der TU Dresden durchgeführt.

15.1 Einführung

Für die Klosterkirche wird ein neues Raumheizungssystem notwendig. Die Wärmeerzeugerseite ist dabei bereits festgelegt, da die Kirche an die zentrale Wärmeversorgungsanlage des Klosters angeschlossen ist. Es sind folglich nur Aussagen zur Wärmeübergabe im Raum zu treffen. Die Findung eines passenden Heizungskonzeptes ergibt sich aus den unterschiedlichsten Anforderungen. Die Gewährleistung des thermischen Komforts für die Nutzer, die Vermeidung von bauklimatisch bedingten Schäden, die Energieeinsparung, denkmalpflegerische Randbedingungen sowie günstige Klimabedingungen für Orgel und wertvolles Interieur und nicht zuletzt die Kosten beeinflussen die Heizungskonzeption. Im Folgenden sollen die technischen Randbedingungen aufgezeigt werden. Bevor mit einer Raumklimasimulation gezeigt wird, welches Innenklima (Temperatur und rel. Feuchte) sich bei entsprechender Fahrweise der Heizung einstellt, soll die benötigte Heizleistung mit den allgemein üblichen Regeln der Technik ermittelt werden.

15.2 Bestimmung der zu installierenden Heizleistung im Kirchenraum

15.2.1 Klassische Auslegung der Heizleistung

Bei der Auslegung von Heizungsanlagen für Kirchen (massive schwere Bauwerke) wird davon ausgegangen, dass diese temporär genutzt werden und folglich nur kurzzeitig auf ein höheres Temperaturniveau geheizt werden müssen. Damit ist der (stationäre) Wärmeverlust über die Wände nach außen für die Bemessung der Heizleistung zu vernachlässigen, da sich in der kurzen Zeit der Beheizung keine stationären Verhältnisse in der Wand einstellen. Wesentlich größer ist die Wärmemenge, die während des Aufheizvorganges in die wandoberflächennahen Schichten der Wand fließt und diese erwärmt. Es ist eine Wärmemenge, die zwar von der Wand aufgenommen wird, aber in der kurzen Zeitspanne nicht durch die Wand bis nach außen transportiert werden kann. Diese Wärmemenge kann in Abhängigkeit von der Aufheizdauer und den thermischen Eigenschaften des Mauerwerks (Wärmeeindringkoeffizient) berechnet oder aus den in der Literatur zu findenden Diagrammen (Recknagel 1997) abgelesen werden.

Weiterhin muss während des Aufheizvorganges die Energie aufgebracht werden, die durch thermisch dünne Bereiche der Konstruktion (wie die Einfachverglasung) sofort an die Außenluft abgegeben wird. Diese Wärmemenge lässt sich mit dem Wärmeübergangskoeffizient und der entsprechenden Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum berechnen.

Ebenfalls muss die Wärmemenge nachgeliefert werden, die mit der Abluft den Kirchenraum verlässt (Lüftungswärmeverluste). Auch dieser Anteil kann leicht mit dem Luftwechsel und der beschriebenen Temperaturdifferenz ermittelt werden.

Damit sind die drei Komponenten vorgestellt, die zur Bestimmung der Heizleistung einer Kirchenheizung herangezogen werden.

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_F + \dot{Q}_W + \dot{Q}_L$$

Gl. 1

\dot{Q}_H	Heizleistung der Kirche
\dot{Q}_F	Wärmestrom über Fenster
\dot{Q}_W	Wärmestrom in die Wände
\dot{Q}_L	Lüftungswärmeverlust

Dieser klassischen Vorgehensweise folgend, kann die benötigte Heizleistung für die Klosterkirche Marienstern mit den folgenden Randbedingungen bestimmt werden.

Tab. 3 Randbedingungen für eine klassische Auslegung der Heizleistung

Außentemperatur	-10 °C
Innenraumtemperatur vor Beginn der Aufheizphase	5 °C
Zu erreichende Innenraumtemperatur	15 °C

Damit ergeben sich folgende Anteile, aus denen sich die Gesamtheizleistung zusammensetzt

Tab. 4 Anteile an der Heizleistung bei einer klassischen Auslegung für den Kirchenraum

	Wärmemenge [kW]
Wärmemenge zur Aufheizung der Wände (Oberflächennahe Schichten)	102
Wärmemenge für Fenster und andere wärmedurchlässige Konstruktionen	28
Lüftungswärmeverluste bei einem 0.5-fachen Luftwechsel	41
Summe	171

Die berechnete Heizleistung bestimmt die Größe der Raumheizflächen und ist damit entscheidend für die Neukonzeption.

Der größte Anteil an der Heizleistung wird für das Aufheizen der Wände benötigt. Es ist zu prüfen, ob dieser Anteil reduziert werden oder gar entfallen kann.

15.2.2 Angepasste Auslegung der Heizleistung

Die Kirche erfährt seit ihrer Entstehung eine kontinuierliche Nutzung durch das Zisterzienserkloster. Mehrmals täglich werden Gebetsstunden abgehalten (siehe Abschnitt 6). Zusätzlich finden wöchentliche Gottesdienste der örtlichen Kirchengemeinde mit bis zu 150 Besuchern statt.

Bei diesem gegebenen Nutzungszyklus erscheint eine **intermittierende Fahrweise der Heizung nicht sinnvoll**. Stattdessen sollte die mittlere Raumtemperatur des Kirchenraumes während der kalten Jahreszeit auf einem geringen Niveau konstant bleiben. Um den Nutzern trotzdem einen angemessenen thermischen Komfort zu ermöglichen, wird ein Teil der notwendigen Heizenergie sehr nah am Nutzer eingebracht. Diese nutzernahen Heizflächen sollten bedarfsangepasst (nutzungsabhängig) mit Wärme versorgt werden. Die Art der Beheizung lässt eine Energieeinsparung aufgrund der Reduzierung der mittleren Raumtemperatur erwarten und ist der Kerngedanke der Neukonzeption.

Damit ergeben sich für die Auslegung der Heizleistung für den Kirchenraum andere Randbedingungen. Wenn die mittlere Temperatur der Kirche konstant zu halten ist, müssen die Wände nicht aufgeheizt werden und die Leistungsanforderung an das Heizungssystem ver-

ringert sich. Die für den dynamischen Anheizvorgang anzusetzende Heizleistung zum Aufheizen der Wände kann entfallen. Stattdessen ist jedoch der durch die Wand bis an die Außenseite fließende Wärmestrom nicht mehr zu vernachlässigen. Dieser Wärmestrom berechnet sich unter stationären Randbedingungen sehr einfach. Die stationären Randbedingungen sind im Inneren vorhanden. Jedoch liegt an der Außenseite ein wechselndes Klima an. Eine Temperaturschwankung, die an einer Seite der Wand stattfindet, wird gedämpft und phasenverschoben durch die Wand geleitet. Das bedeutet, dass eine kalte Witterungsperiode erst nach einer bestimmten Zeit an der Innenseite der Wand spürbar ist. Die Eindringtiefen sind dabei abhängig von den Materialeigenschaften und der Dauer einer Temperaturschwankung. Tagesschwankungen beeinflussen das Mauerwerk nur bis in eine Tiefe von ca. 10 bis 20 cm. Eine Monatsschwankung erreicht Eintrittstiefen um einen Meter. Dies entspricht ungefähr den Wandstärken, die an der Kirche vorzufinden sind. Dementsprechend sollten die für eine Leistungsberechnung der Heizung anzusetzenden Temperaturdifferenzen auch dieser Phasenverschiebung Rechnung tragen. Die Verwendung der Monatsmitteltemperatur des kältesten Monats erscheint sinnvoll.

Als Randbedingungen für die Berechnung der Heizleistung wird angesetzt:

- Reduzierung des Luftwechsel auf 0,2 pro Stunde (durch CO₂- Messungen bestätigt)
- Temperaturdifferenz für die Berechnung der Lüftungswärmeverluste und der Transmissionswärmeverluste über Fenster 20 K (Raumtemperatur 10°C, Außentemperatur -10°C)
- Temperaturdifferenz für die stationäre Berechnung der Transmissionswärmeverluste über die Wände 10 K (Raumtemperatur 10°C, Außentemperatur 0°C)

Tab. 5 Anteile an der Heizleistung bei einer angepassten Auslegung

	Wärmemenge [kW]
Stationärer Transmissionswärmeverlust über die Wände	37
Wärmemenge für Fenster und andere wärmedurchlässige Konstruktionen	28
Lüftungswärmeverluste bei einem 0.2- fachen Luftwechsel	16
Summe	81

Diese zu installierende Leistung liegt mit 8,5 W/m³ an der unteren Grenze dessen, was in der Literatur angegeben wird. Stephani (Stephanie et al. 2007) gibt bei dem Überblick über westsächsische Kirchengebäude der evangelischen Landeskirche einen Mittelwert von ca. 30 W/m³ und ein Minimum von 18 W/m³ an, während bei Arendt (1993) Mittelwerte von 19 W/m³ und minimale Werte von 8 bis 10 W/m³ zu finden sind.

Die Berechnungen mit dem Gebäudesimulationsprogramm sollen für die Klosterkirche bestätigen, dass diese Heizleistung bei der kontinuierlichen Fahrweise ausreichend ist.

15.3 Einsatz von Raumklimasimulationen

15.3.1 Allgemeines

Die Berechnung des Raumklimas in Abhängigkeit von der Heizung, Lüftung, Nutzung und dem Außenklima ist mit mathematischen – physikalischen Modellen möglich. Diese sind in Computerprogrammen umgesetzt und stehen den entsprechenden Fachleuten und Planern zur Verfügung. Für die Auslegung von Heizungssystemen ist die Nutzung der Gebäudesimulation im Allgemeinen ungebräuchlich, da im Regelwerk des Deutschen Instituts für Normung (DIN) alle notwendigen Anforderungen für die Mehrzahl aller Anwendungen festgehalten sind. Für die Beurteilung von Sonderbauten zu denen Kirchbauten gehören sowie bei vom Normalfall abweichenden Anforderungen an das Innenklima, ist die Verwendung von Simulationswerkzeugen als Planungshilfsmittel zu empfehlen.

Um die Ergebnisse einer Simulationsrechnung als Planungsgrundlage zu verwenden, müssen drei Anforderungen erfüllt sein:

1. Der verwendete Berechnungsalgorithmus muss die reale Situation richtig wiedergeben können.
2. Das Programm muss fehlerfrei rechnen und
3. die Randbedingungen müssen richtig sein.

Dementsprechend ist es notwendig, dass die einzusetzenden Softwareprogramme validiert sind. Eine Validierung von Software bedeutet, durch Vergleichen mit Messungen oder anderen gesicherten Berechnungsmethoden nachzuweisen, dass die Programme fehlerfrei sind und die Ergebnisse in einem Toleranzbereich liegen.

Wenn die Programme fehlerfrei arbeiten, muss sichergestellt werden, dass die reale zu untersuchende Problematik auch mit dem Programm abgebildet werden kann. Dies obliegt dem jeweiligen Fachplaner. In der thermischen Gebäudesimulation sind die Zusammenhänge überschaubar und bei den Fachingenieuren ist ein hoher Stand an Wissen und Erfahrungen vorhanden. Wenn folglich validierte Programme und Fachleute zur Verfügung stehen, dann sollten die Ergebnisse nur noch von den Eingangsparametern abhängig sein. Die Eingangsparameter unterliegen jedoch einer gewissen Schwankungsbreite. Diese Schwankungsbreite muss so gering wie möglich gehalten werden. Beim Neubau ist die Bestimmung der Eingangsparameter festgelegt. Alle thermischen und hygrischen Eigenschaften der Konstruktionen (Wand- und Fußbodenaufbauten, Verglasungen etc.) sind bekannt. Sie sind in Produktblättern und Bauzulassungsprotokollen hinterlegt oder können beim Hersteller erfragt werden.

Bei der Raumklimasimulation für ein Bestandsgebäude, welches seit Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten vorhanden ist, können die Eigenschaften der Materialien häufig nur geschätzt werden. Für die ausgeführten Bleiverglasungen, das Mischmauerwerk oder die Fußbodenaufbauten existieren keine Produktblätter. Hier müssen die Eigenschaften sinnvoll abgeschätzt werden.

Weiterhin beeinflusst der Luftwechsel das Innenklima entscheidend. Bei frei gelüfteten Gebäuden kann diese Größe nur sehr schwer ermittelt werden.

Aufgrund der genannten Unsicherheiten bei den Eingangsparametern für die Raumklimasimulation bei bestehenden Gebäuden hat sich folgende Methode besonders bewährt. Da das Gebäude bereits existiert, ist es möglich in Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen die Innen- und Außenklimaparameter aufzuzeichnen.

Unter Verwendung des gemessenen Außenklimas kann nun mit der Gebäudesimulation das Innenklima berechnet werden. Die Ergebnisse der Berechnung sind mit den Messungen zu vergleichen. Dadurch erhält man die Sicherheit, dass die aufgebaute Gebäudebeschreibung und die Eingangsparameter dem realen Zustand entsprechen. Stimmen die Ergebnisse nicht mit den Messungen überein, können die Eingangsparameter korrigiert werden. Erst wenn es möglich ist einen gemessenen Verlauf äquivalent mit der Gebäudesimulation darzustellen, besteht die Sicherheit, dass die Berechnungen für eine weitere Planung verwendet werden können.

Sind die Berechnungen durch Messungen bestätigt, können weitere Variantenrechnungen beginnen. Man kann diese Methodik als qualifizierte Innenklimaberechnung bezeichnen.

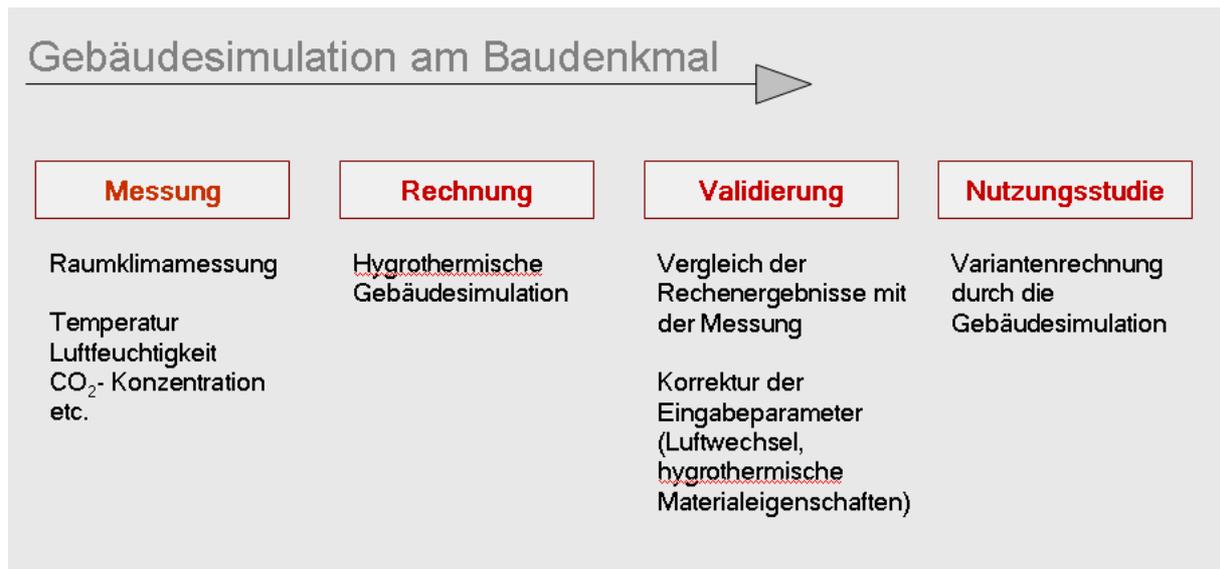


Abb. 141 Methode der qualifizierten Gebäudesimulation bei bestehenden Gebäuden

15.3.2 Nachrechnung der Messergebnisse der Klosterkirche St. Marienstern

Der Verlauf des Innenklimas wurde in der Zeit vom 04.03.2006 bis 30.11.2006 lückenlos aufgezeichnet. Diese 272 Tage sind ausreichend für einen Vergleich der Rechnung mit der Messung. Dass keine Messung des Innenklimas in der Heizzeit zur Verfügung steht, ist nicht von Nachteil. In der Heizzeit ist ein Innenklima erfasst worden, welches durch die Heizung dominiert wird. Da von der Heizung aber keine Messwerte vorliegen (stündliche Wärmemengen-zufuhr), ist ein Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen nicht möglich. Aus diesem Grund wird das Gebäudemodell in der Zeit mit den Messungen verglichen, in der sich das Innenklima frei einstellt, also außerhalb der Heizzeit.

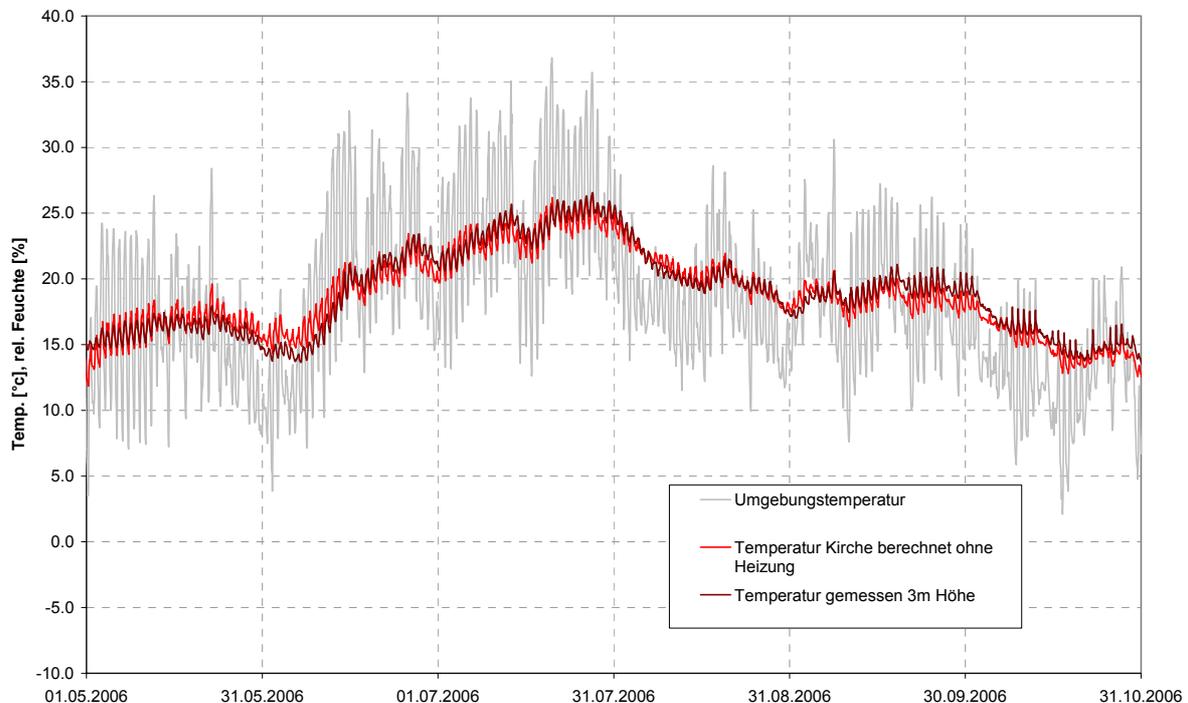


Abb. 142 Darstellung der berechneten und gemessenen Temperaturen

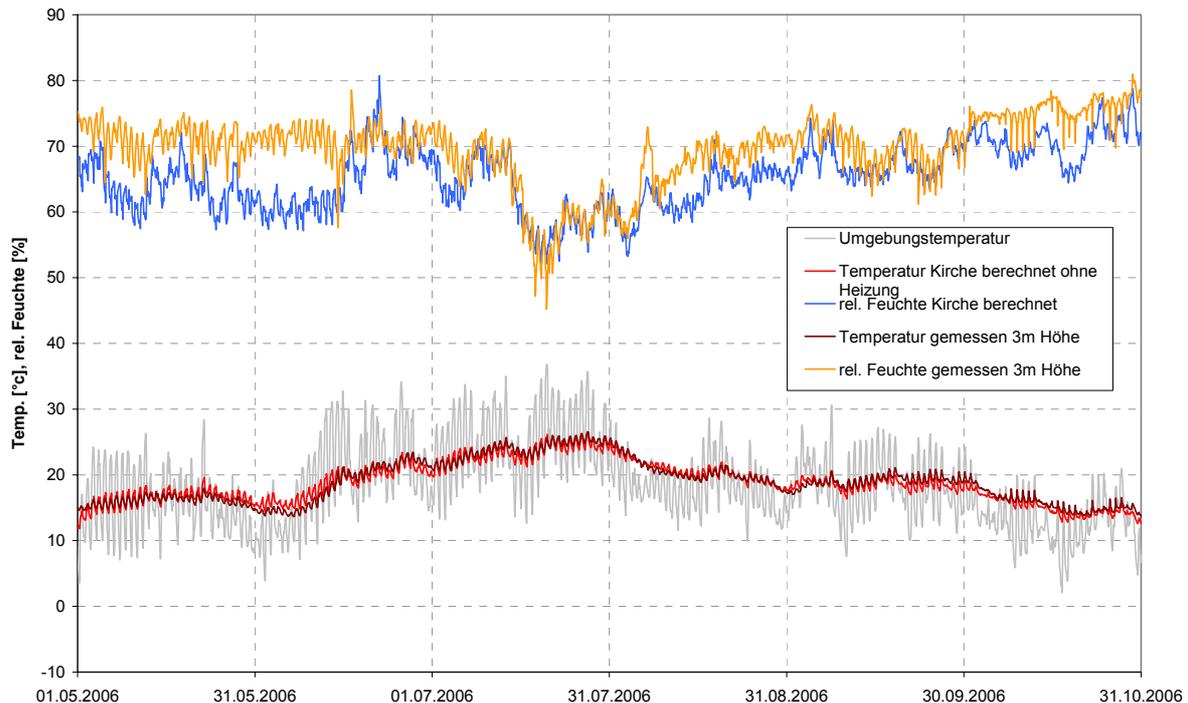


Abb. 143 Darstellung der berechneten und gemessenen Temperaturen und rel. Luftfeuchte (konstanter Luftwechsel)

15.3.3 Hygrische Berechnungen mit dem Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS

Bisher wurden nur thermische Berechnungen dargestellt. Die rel. Feuchte der Raumluft, mit ihren konservatorischen und möglichen bauschädigenden Auswirkungen ist von großer Bedeutung. Die rel. Feuchte wird durch die Raumtemperatur bestimmt und damit durch das Heizungssystem entscheidend beeinflusst. Es sollte somit das Ziel derartiger Untersuchungen sein, auch eine Aussage zur Raumluftfeuchte zu treffen.

Das so genannte „Type 56“ (Gebäudesimulation) des numerischen Berechnungsprogramms TRNSYS verfügt über ein so genanntes „buffer storage model“, bei dem lediglich zwischen einem Oberflächen- und einem Tiefenspeicher unterschieden wird. Entsprechend der auftretenden Wassergehaltsgradienten zwischen der Raumluft, dem Oberflächenspeicher und dem Tiefenspeicher werden zu jedem Berechnungsschritt die Massenströme bestimmt. Die Speicherfähigkeit der beiden Speicher wird durch die Steigung der als linear angenommenen Sorptionsisothermen und der Masse gegeben.

Dieses vereinfachte Modell prägt dem Feuchtegehalt der Raumluft gewisse Trägheitseigenschaften auf, ist aber für eine detaillierter Betrachtung von großen Speichermassen und komplexeren Speichervorgängen vollkommen ungeeignet, da die Transporteigenschaften unberücksichtigt bleiben und die Speichereigenschaften mit nur zwei Schichten nicht realitätsnah abgebildet werden können.

Eine einfache Komponente zur Berechnung von Diffusionsvorgängen

Aufbauend auf den Arbeiten von H. Wagner und C. Muß (Muß 1994), die einen Berechnungsalgorithmus für Wasserdampfdiffusion in Festkörpern als TRNSYS-Type aufbereiteten, wird die Feuchteleitungsgleichung (Gl. 3) räumlich in Form eines Pyramidenstumpfes diskretisiert.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{D}{\mu} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

Gl. 2

Dabei können beliebig viele Schichten verwendet werden. Die Anwendung eines Pyramidenstumpfes für die Diskretisierung ist besonders hilfreich für die Berechnung von innenliegenden Speichern (z.B. Bücher), die von mehreren Seiten beaufschlagt werden (Abb. 144). Für die einzelnen Materialschichten müssen die Materialparameter Schichtdicke, Dichte, Diffusionswiderstand, Steigung der Sorptionsisothermen und Wärmeleitfähigkeit angegeben werden. Vereinfachend wird die Sorptionskurve linearisiert und die Diffusionswiderstandszahl als nicht feuchteabhängig angenommen.

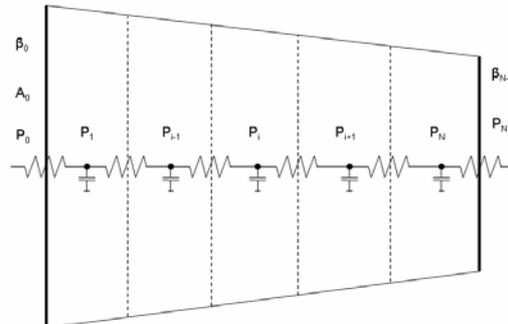


Abb. 144 Schematische Darstellung der Diskretisierung des Diffusionsmodells

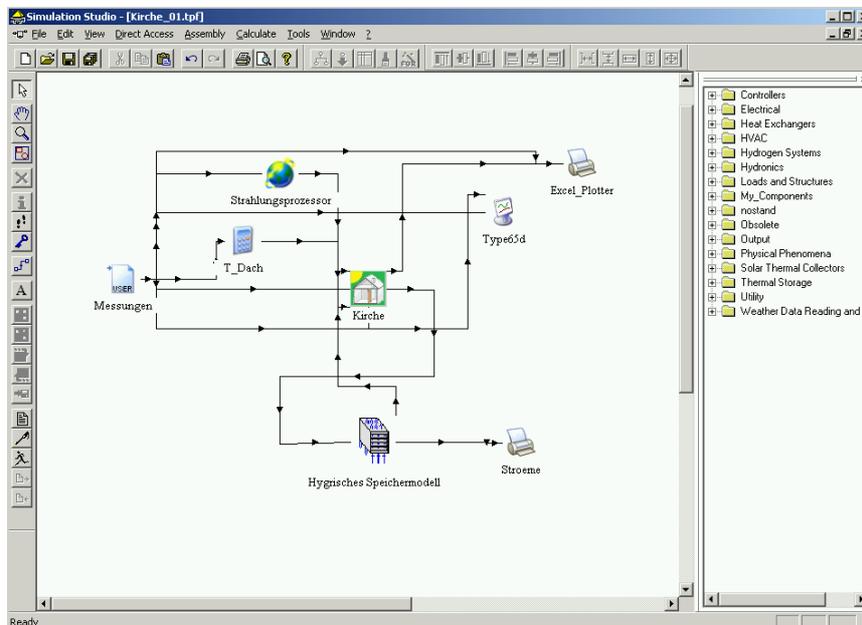


Abb. 145 Darstellung der Integration zwischen dem Gebäudemodell TRNSYS-Type 56 (Kirche) und dem Hygri-schen Speichermodell in der Darstellung der Softwareoberfläche „Simulation Studio“

Der Berechnungsalgorithmus kann als externe DLL (Dynamic Link Library) kompiliert und durch die Standard-TRNSYS16 Version genutzt werden. Die an den Oberflächen des hygri-schen Speichers (Wände, Einbauten etc.) anliegenden Randbedingungen werden durch das TRNSYS-Gebäudesimulationsmodul (Type 56) zur Verfügung gestellt. Die von dem hygri-schen Speicher auf oder abgegebenen Feuchtemengen werden an die Gebäudesimulation zurückgeliefert und so für jeden Zeitschritt mit bilanziert.

Damit ist es möglich auch die Feuchtbilanz des Raumes mit den speichernden Eigenschaften der Materialien wesentlich genauer mitzubetrachten als dies mit dem Feuchtespeichermodell von TRNSYS möglich ist. Dieser TRNSYS Type kann in der Gebäudebeschreibung mehrfach eingesetzt werden, um unterschiedliche Wände oder andere Speichermassen zu betrachten.

15.3.4 Variantenberechnung mittels Gebäudesimulation.

Nachdem im Kapitel „Nachrechnung der Messergebnisse der Klosterkirche St. Marienstern“ gezeigt wurde, dass es möglich ist den gemessenen Temperatur- und Feuchteverlauf der Raumluft nachzurechnen, können Varianten betrachtet werden. Dazu wird als Außenklima das für diese Region gültige Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes angesetzt (DWD2004). Die Klimadaten der Testreferenzjahre zeigen für die Region typische Witterungsverläufe und können so für die Auslegung von Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung verwendet werden. Der Standort Marienstern liegt im Bereich des TRY 9 „Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland“. Die Abb. 146 zeigt die sich ohne Heizung einstellenden Temperaturen im Kirchenraum. Die Temperatur im Kaldach der Kirche wird in Anlehnung an die Messergebnisse mit Außentemperatur plus 2,5 K angenommen.

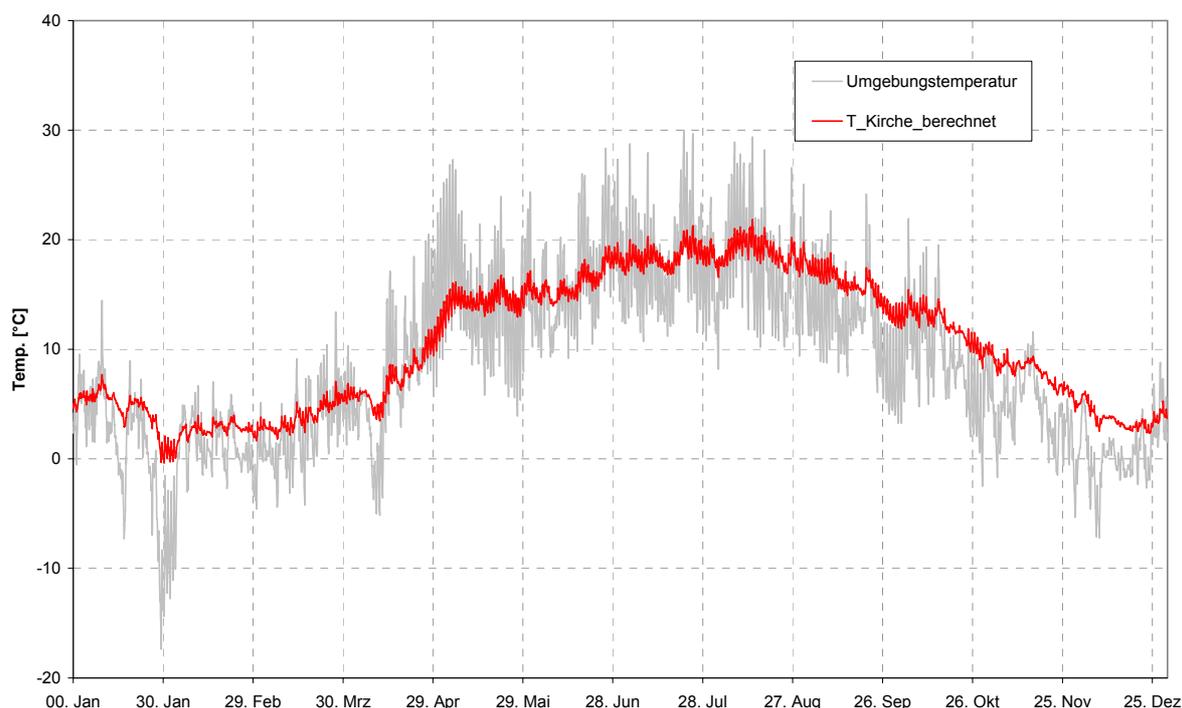


Abb. 146 Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur ohne Heizung

Die berechnete Kurve zeigt die Raumlufttemperatur, die sich ohne Heizung einstellt. In der kalten Jahreszeit treten im Kircheninnenraum Temperaturen um den Gefrierpunkt auf. Soll eine höhere Temperatur im Winter erreicht werden, muss geheizt werden.

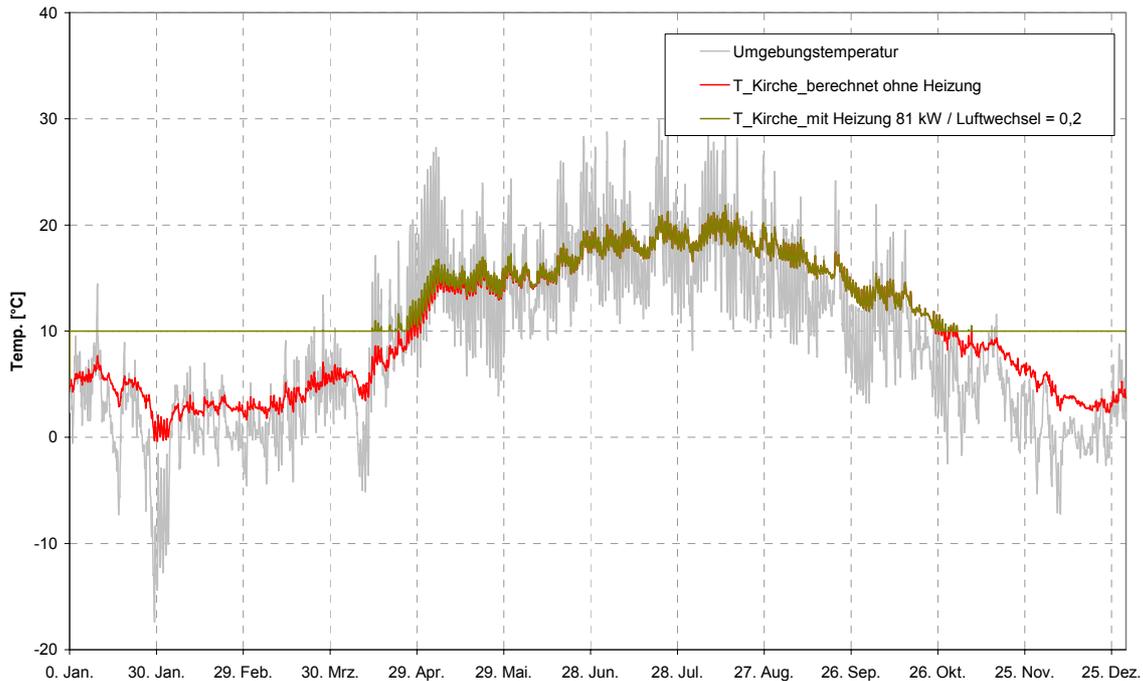


Abb. 147 Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur mit Heizung (auf 10°C) (Heizleistung 81 kW)

Wenn auf eine bestimmte Temperatur im Winter geheizt wird (Raumsolltemperatur = 10°C) stellt sich der in Abb. 147 dargestellte Innentemperaturverlauf ein. Dabei ist die Frage zu beantworten, ob die geplante Heizleistung ausreichend ist, um die geforderte Raumtemperatur zu garantieren. Die Ergebnisse der Berechnung mit dem mittleren Testreferenzjahr, einem Luftwechsel von 0.2 h⁻¹ und einer begrenzten Heizleistung von 81 KW (293 MJ/h) zeigen, dass die Heizungsanlage in der Lage ist die geplanten 10 °C Raumtemperatur aufrecht zu halten. Die Raumlufttemperatur sinkt nicht unter 10°C.

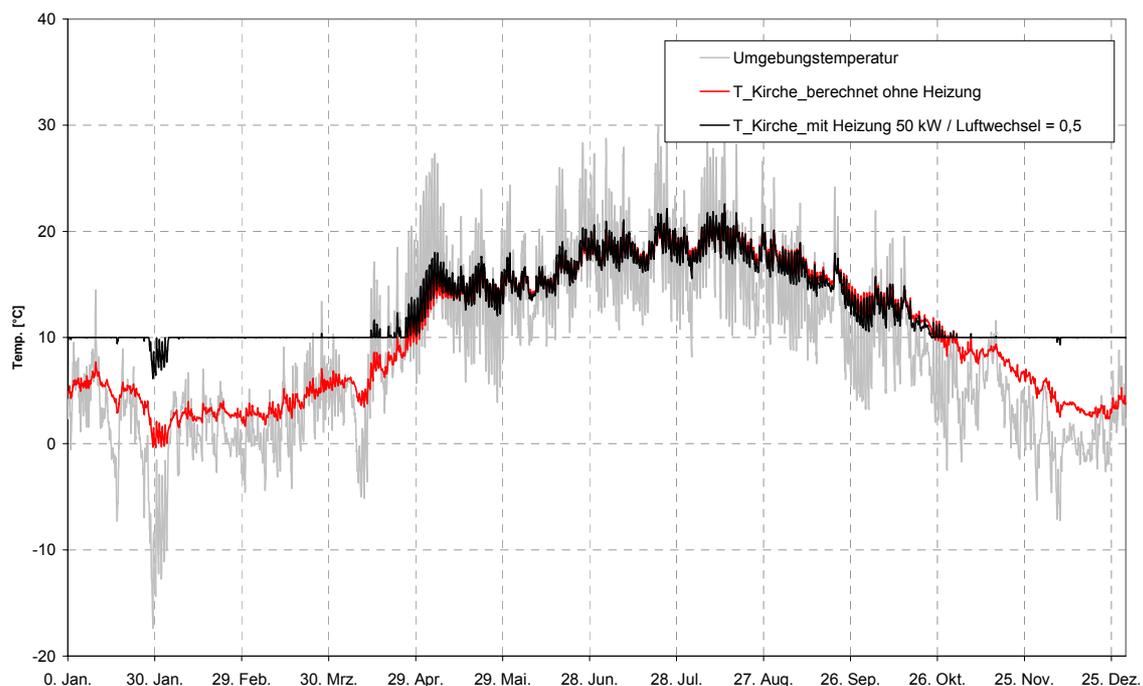


Abb. 148 Jahresverlauf der Außentemperatur TRY (grau) und der berechneten Innenraumtemperatur mit Heizung (auf 10°C) (Heizleistung 50 kW)

Bei dem geringen Luftwechsel von $0,2 \text{ h}^{-1}$ und dem angesetzten Testreferenzjahr kann die Raumtemperatur von 10°C auch mit 50 kW Heizleistung erbracht werden. Wenn die Luftwechselzahl allerdings auf $0,5$ pro Stunde angehoben wird, ist die Raumlufthottemperatur von 10°C bei geringen Außentemperaturen mit einer 50 kW Heizung nicht zu halten (Abb. 148).

Bei den hier durchgeführten Berechnungen ist ein Testreferenzjahr mit mittleren Temperaturen hinterlegt. In der Realität werden aber auch wärmere und kältere Winter eintreten. Aus diesem Grund ist die später zu installierende Heizung mit einer Sicherheit- oder Reserveleistung zu versehen oder in einem späteren Stadium der Planung mit extremeren Randbedingungen erneut zu rechnen und mit dem Bauherrn und Nutzer zu diskutieren.

15.3.5 Aussagen zum Energieverbrauch

Entscheidend für den Energiebedarf ist die mittlere Raumlufthottemperatur während der kalten Jahreszeit im Kirchenraum. Die Differenz zwischen dieser mittleren Raumlufthottemperatur und der mittleren Außentemperatur während der Heizzeit ist in erster Näherung proportional dem Heizwärmebedarf.

Dementsprechend kann das Ziel Heizenergie zu sparen, am wirksamsten durch eine Absenkung der Raumlufthottemperatur erreicht werden. Dies ist in Tab. 6 für die Kirche dargestellt.

Tab. 6 Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Innenraumtemperaturen während der Heizzeit ($n = 0,2 \text{ h}^{-1}$)

Raumsolltemperatur	Heizwärmebedarf [MWh/a]
20°C	331,5
12°C	127,4
10°C	91,0
8°C	58,1

Bildlich kann dieser Sachverhalt in Abb. 149 verdeutlicht werden. Die farbig dargestellten Flächen zwischen dem sich ohne Heizung einstellenden Temperaturverlauf und der Sollraumlufthottemperatur entspricht dem Heizwärmebedarf. Die orangefarbige Fläche beschreibt den Heizwärmebedarf, wenn auf 8°C geheizt wird. Wird auf 10°C geheizt, muss der grüne Anteil addiert werden. Wird die Temperatur auf 12°C erhöht, kommt die rote Fläche hinzu. Neben der Temperaturdifferenz hat die Dauer der Heizzeit Einfluss auf den Energiebedarf. Die Heizzeit verlängert sich mit steigenden Innentemperaturen. Dies wird im Diagramm sehr deutlich: die roten Balken (Heizung auf 12°C) sind länger als die grünen Balken (Heizung auf 10°C). Um die Kirche auf 12°C zu halten, muss über einen längeren Zeitraum Energie zugeführt werden, als wenn die Raumsolltemperatur nur 10°C beträgt.

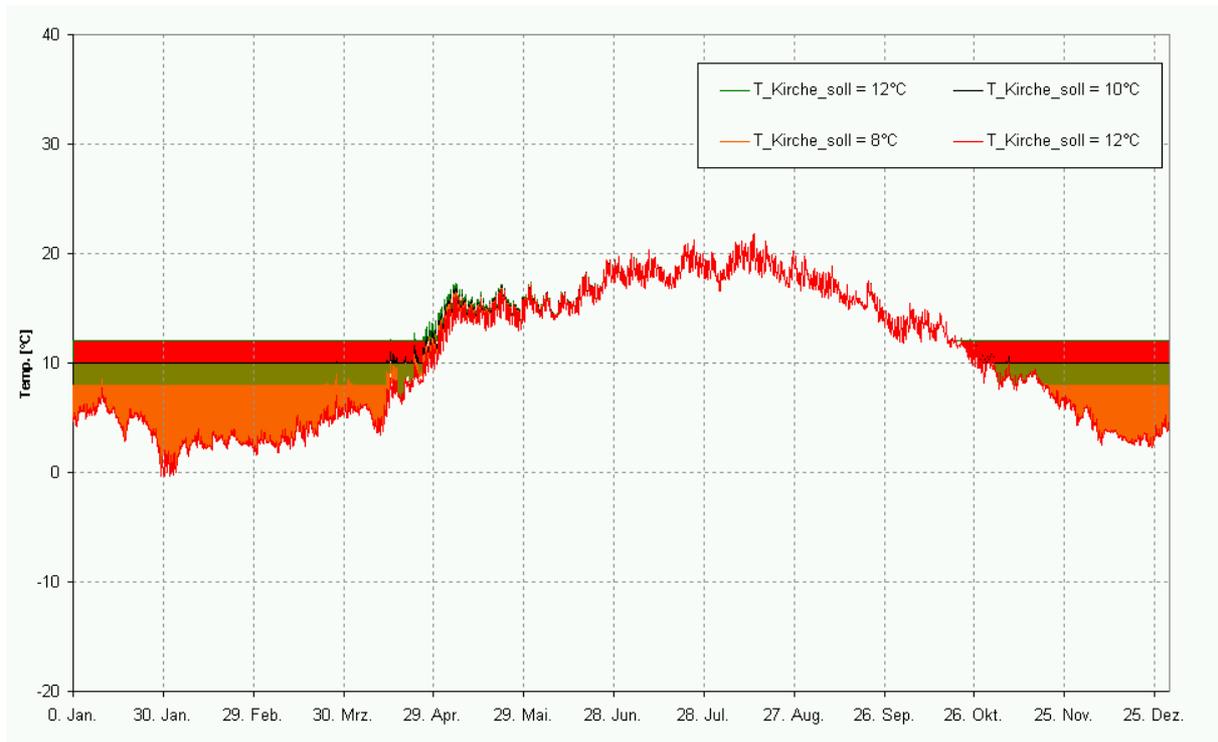


Abb. 149 Verdeutlichung des Heizenergiebedarfes (farbige Flächen charakterisieren den Heizwärmebedarf) bei unterschiedlichen Raumtemperaturen während der Heizperiode

Wärmedämmung der Decke zum Kaldach

Die Energieeinsparung, die aufgrund der Dämmung (10 cm Wärmeleitgruppe 040) zum Dachraum zu erwarten ist, liegt im Bereich von 5 bis 7%. Die Dämmung des Gewölbes führt zu höheren Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Gewölbedecke. Diese höhere raumseitige Temperatur beeinflusst die Raumluftströmung im Raum positiv und vermindert ebenfalls das Kondensationsrisiko.

15.3.6 Aussagen zur Raumlufffeuchte

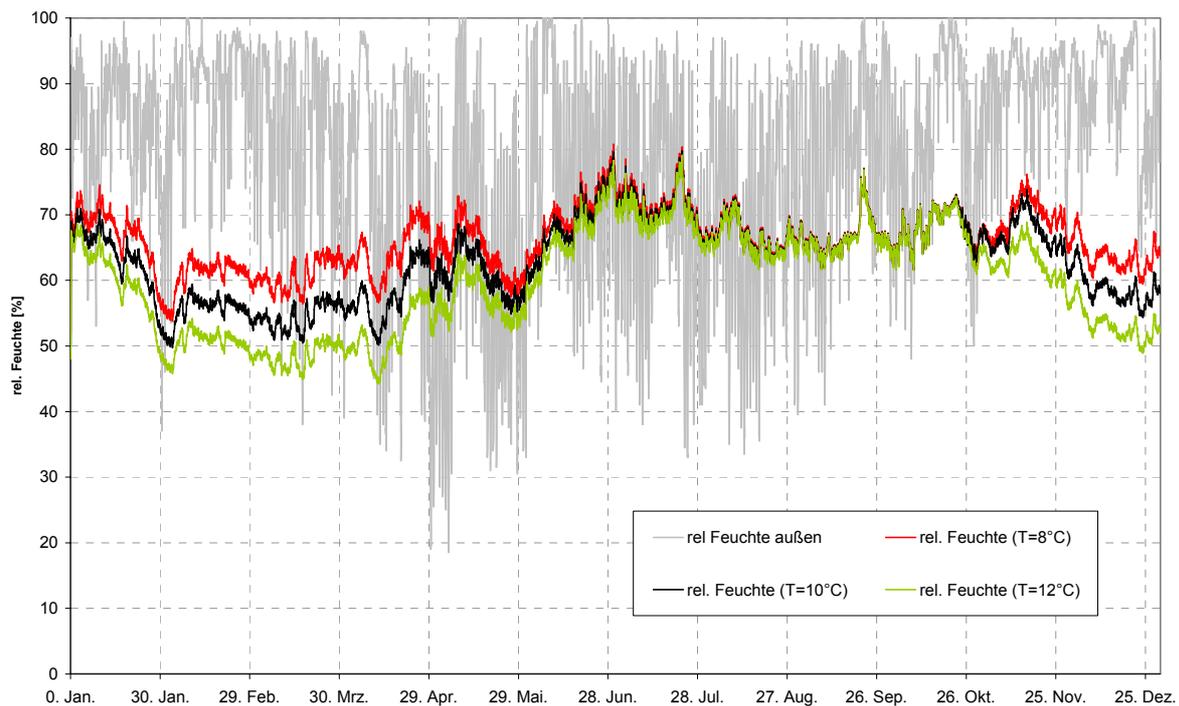


Abb. 150 Verlauf der sich einstellenden rel. Feuchte bei unterschiedlichen Heizsolltemperaturen

Die rel. Feuchte der Raumluff im Winter sinkt mit steigender Raumlufftemperatur. Dem Kirchenraum wird aufgrund des stattfindenden Luftaustausches trockene kalte Außenluft zugeführt. Diese Luft wird erwärmt und die relative Feuchte sinkt bei gleich bleibendem Wassergehalt. Die Feuchtespeicherung der Wände und Materialien sowie der Zuführung von Feuchtigkeit aufgrund der Nutzung (Personen) wirkt einer Austrocknung entgegen, trotzdem sinkt die rel. Luftfeuchtigkeit während der kalten Periode bei einer Beheizung auf 12°C unter 50%. Es gilt aber festzuhalten, dass bei einer weiteren Senkung der mittleren Temperatur z.B. auf 8°C keine zu hohen Raumlufffeuchten zu erwarten sind.

15.4 Zusammenfassung zum Innenklima

- Die „klassische“ Auslegung der Heizungsanlage für eine Aufheizphase von 5°C auf 15°C bei einer Außentemperatur von -10°C ergibt für den Kirchenraum eine Heizleistung von ca. 170 kW. Dabei wurde ein 0,5 - facher Luftwechsel unterstellt.
- Eine Auslegung der Heizleistung unter Vernachlässigung der Aufheizphase (aufgrund der kontinuierlichen Nutzung wird der Raum auf einer konstanten Temperatur gehalten) und eine Anpassung des Luftwechsels auf 0,2 1/h ergibt eine Heizleistung von 81 kW.
- Die gemessenen Verläufe des Innenklimas können rechnerisch nachvollzogen werden. Damit gilt die rechentechnische Gebäudebeschreibung für die Simulation als qualifiziert und ist für weitere Untersuchungen geeignet.
- Durch die thermische Gebäudesimulation konnte ermittelt werden, dass eine weitere Reduzierung der Heizleistung möglich ist ohne die Sollraumtemperatur der Kirche von 10°C zu unterschreiten.
- Die Energieeinsparung durch Reduzierung der mittleren Raumsolltemperatur konnte mit der Gebäudesimulation ausgewiesen werden. Durch die weitere Absenkung der mittleren Raumtemperatur während der Heizperiode wird die rel. Feuchte der Raumluff erhöht. Dies ist aus konservatorischer Sicht als positiv zu werten, da der Jahresverlauf der rel. Feuchte nun gleichmäßiger verläuft. Dem entgegen werden aber kalte Bauteiloberflächen kritischer.

- Die Energieeinsparung aufgrund der Dämmung zum Dachraum liegt im Bereich von 5 bis 7%. Die Dämmung hat eine positive Wirkung auf die Raumluftrömung und verringert das Kondensationsrisiko.
- Mit einem einfachen, neu in TRNSYS integrierten Berechnungsmodul kann das Feuchtespeicherverhalten der Umfassungskonstruktion hinreichend genau abgebildet werden.
- Bei einer weiteren Reduzierung der Raumsolltemperatur sind keine überhöhten Raumlufffeuchten zu erwarten.

15.5 Aussichten

Erste technische Rahmenbedingungen für eine Konzeption und Dimensionierung der neuen Raumheizung sind mit diesen Untersuchungen festgelegt. Die Zuführung eines Teiles der Wärme sehr nah am Nutzer zur Reduzierung der mittleren Raumlufftemperatur wird erforderlich. Zusätzlich muss aber auch dafür gesorgt werden, dass Wärme an den bauphysikalisch kritischen Bereichen der Außenwände zugeführt wird. Zum einen sollte möglichen Feuchteschäden vorgebeugt werden, zum anderen ist es notwendig, die Wärme nicht punktuell oder zentral sondern weit verteilt einzubringen. Dies soll einem ungünstigen Raumlufftrömungsverhalten entgegenwirken.

Ist der konstruktive Aufbau der einzelnen Heizungssysteme bekannt, kann mit der Gebäudesimulation genau ausgeführt werden, welche Energie über die Fußbodenheizung im Chorgestühl und in den Bankreihen an den Raum abgegeben werden kann und welche Wärme über die anderen Heizflächen einzubringen ist. Dementsprechend können die einzelnen Heizkreise, die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Platzbedarf aufeinander abgestimmt und ein Regelungskonzept entworfen werden.

16 2. Expertentreffen

Auf dem Expertentreffen am 30. September 2008 in Marienstern wurden die bis dahin vorliegenden Ergebnisse und daraus abzuleitenden Schlussfolgerungen mit externen Fachleuten intensiv diskutiert. Als Experten nahmen an dem Treffen teil:



Dr.-Ing. Claus Arendt
Beratender Architekt
Valleystr. 36
81371 München
089 / 76 70 31 33
dr.ing.claus.arendt@t-online.de

Dipl.-Ing. Lutz Baumann
Ingenieurbüro NIEHSEN-BAUMANN
Wiesenufer 7
09123 Chemnitz
03 72 09 / 8 04 01
info@niehsen-baumann.de

Dipl.-Ing. Thomas Bönisch
Domkapitel St. Petri
Schloßstr. 24
01067 Dresden
0351 / 3364753
thomas.boenisch@ordinariat-dresden.de

Dr. Christoph Franzen
Dipl.-Ing.(FH) Thomas Löther
Dipl.-Ök. Ellen Schmid-Kamke
Dipl.-Ing. Stefan Weise
Johannes Weißflog
Institut für Diagnostik und Konservierung an
Denkmälern in Sachsen und Sachsen Anhalt
Schloßplatz 1
D-01067 Dresden
0351 / 48430 410/427/408
01712865735
franzen@idk-info.de
loether@idk-info.de
schmid-kamke@idk-info.de
weise@idk-info.de

Dr.-Ing. Olaf Freytag
Hochschule für Technik,
Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH)
Fachbereich Bauwesen / Hochbau
Postfach 30 11 66
D-04251 Leipzig
0341 / 30766650
freytag@fbb.htwk-leipzig.de



Dipl.-Ing. Dietrich Berger
Dipl.-Rest. Christine Kelm
Dr.-Ing. Ralf Pinkwart
Landesamt für Denkmalpflege Sachsen
Schloßplatz 1
01067 Dresden
0351 / 48430 416
Christine.Kelm@fd.smi.sachsen.de

Dipl.-Rest. Ralf Kilian
Fraunhofer Institut für Bauphysik
Fraunhoferstraße 10
83626 Valley
08024 / 643285
ralf.kilian@ibp.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Johannes Lukasch
Sr Thaddäa Selnack
Zisterzienserinnen – Abtei
St. Marienstern
Čišinskistr. 35
01920 Panschwitz-Kuckau
035796 / 99412
verwaltung@marienstern.de

Dipl.-Ing. (FH) Simone Reeb
Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Petersenstr. 12
64287 Darmstadt
06151 / 164042
reeb@massivbau.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Uwe Meinhold
Dr. Graupner
Institut für Bauklimatik
Technische Universität Dresden
Zellescher Weg 17 (BZW)
01062 Dresden
0351 / 4633 48 37 (Roloff)
0351 / 4633 2950 (Meinhold)
jdroloff@web.de
uwe.meinhold@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Alexandra Troi
Eurac research
Europäische Akademie Bozen
Drususallee 1
39100 Bozen
Italien
+39 (0471) / 055314
alexandra.troi@eurac.edu

lic. phil. Marius Winzeler
Direktor der Städtischen Museen Zittau
Klosterstraße 3
02763 Zittau
marius.winzeler@t-online

16.1.1 Programm des Expertentreffens am 30. September 2008

ERÖFFNUNG (SEMINARRAUM ROTER SAAL)

08:30 **Begrüßung**

Äbtissin Sr. Benedicta Waurick, Kloster St. Marienstern, Panschwitz Kuckau

KURZBEITRÄGE (SEMINARRAUM ROTER SAAL)

08:45 **Einführung in das Projekt**

Dr. Christoph Franzen, IDK e. V., Dresden

08:55 **Restaurierungsgeschichte der Klosterkirche**

Lic. phil. Marius Winzeler, Städtische Museen Zittau

09:10 **Bestandssituation, Aufgaben, Messergebnisse (Klima, Rauch, IR, CO₂ etc.)**

Dipl.-Ing. Thomas Löther, IDK e. V., Dresden

09:35 **Computersimulationen**

Dipl.-Ing. Uwe Meinhold, Inst. für Bauklimatik, TU-Dresden

09:50 **Konzept zur Umgestaltung der Beheizung**

Dipl.-Ing. Thomas Löther, IDK e. V., Dresden

BESUCH DER KLOSTERKIRCHE

10:10 **Kritische Diskussion der Umgestaltungsmaßnahmen**

ALLE Teilnehmer des 2. Expertentreffens

SEMINARRAUM ROTER SAAL

10:30 – 10:50 KAFFEE

10:50 **Diskussion; Einbindung Ergebnisse anderer wichtiger Projekte**

12:10 **Zusammenfassende Diskussion**

12:30 - 13:30 MITTAGESSEN IM KLOSTER

BESUCH DER SCHATZKAMMER UND DES KLOSTERHEILTUMS

ABSCHLUSS

14:15 **GRUPPENFOTO**

ALLE

16.1.2 Diskussionsrunde zum 2. Expertentreffen

Auszüge verschiedener Punkte aus der Diskussionsrunde des 2. Expertentreffens

Meinhold:

- Heizleistung von 50-70kW
- Einsparung durch die Vernachlässigung des Wärmebedarfs für die Aufheizung Wände bei diskontinuierlicher Nutzung
- Rechnung mit einer Luftwechselrate von $0,5h^{-1}$ bei klassischer Auslegung zum Ansatz gebracht
- in Simulationsrechnungen werden angepasste Randbedingungen verwendet

Arendt:

- Vernachlässigung der kalten Wände als kritisch zu betrachten
- Luftwechselrate von $0,5h$ viel zu hoch für die große Kirche

Freytag:

- Bestätigung der jetzigen Heizleistung von ca. 50kW durch Masterarbeit eines Studenten (Köhler 2008)

Franzen:

- Anbringung einer Gewölbedämmung aus denkmalpflegerischer Sicht möglich?

Pinkwart:

- keine Probleme aus denkmalschützerischen Gründen

Arendt:

- Gewölbedämmung zur Energieeinsparung fällt in diesem Fall raus
- Gewölbedämmung zur Verringerung der dort auftretenden Verschmutzung ist zu empfehlen, es sollte dann auch eine erneute Simulation mit Dämmung erfolgen

Graupner:

- Gewölbedämmung kommt dem sommerlichen Wärmeschutz nicht zu gute
- hat sich in anderen Projekten bewehrt, ist in jedem Fall zu empfehlen

Weise:

- Grundtemperierung von Nöten?
- Was passiert ohne eine Heizung?

Arendt:

- keine Beheizung bei einer so oft benutzten Kirche macht keine Sinn
- Beschwerden der Kirchgänger ohne Heizung
- ohne Heizung wird die Verschmutzung verringert
- Luftbewegung abhängig von der beheizten Fläche
- Entstehen bei der Heizung der Kirche Schäden an der Einrichtung?
- regelungsfähiges Heizsystem kosten zwischen 4k-8k€
- es empfiehlt sich in jedem Fall eine sensorgesteuerte Lüftungsanlage einzubauen
- die Kirche sollte insgesamt die gleiche Temperatur haben

Kelm:

- es gibt keine weiteren Schäden als die der Verschmutzung, die man auf die Heizung zurückführen kann

Meinhold:

- Temperierung der kalten Nordwand durch Wandheizung oder Fußbodenkonvektoren
- Entgegenwirken der Fallwinde

Baumann:

- Anregung zur Anordnung der Heizelemente von Meinhold geht in die richtige Richtung
- keine gleichmäßige Temperierung durch eine Fußbodenheizung, zu träge
- Verschlammungsgefahr der dünnen Heizelemente in der Wand

Kilian:

- Sockel- und Wandheizungen haben sich bewährt bei einem Projekt in Bayern
- ist der Putz dick genug oder darf die Wand angegangen werden?

Arendt:

- Ergebnisse zeigen, dass bei einer Sockelheizung nicht vier Meter Wand erwärmt werden sondern nur ein paar Zentimeter.

Berger:

- kein Eingriff an den Wänden, eher am Fußboden
- Fußboden minderwertiger als die Wand

Winzeler:

- Aufnahme des Fußbodens stellt kulturhistorisch eine große Herausforderung dar, da sich im Boden viele Grabstellen befinden

Arendt:

- große Wärmeverluste nach außen ohne eine Dämmung bei der Wandheizung → größerer Wandaufbau

Freytag:

- vorgesetzte Wandschale mit Kapillarheizsystem an der Nordwand, gibt es dafür ästhetisch vertretbare Lösungen?

Meinhold:

- Anbringen einer Doppelverglasung um Energie zu sparen mit erneuter Simulationsrechnung
- Verringerung der Fallwinde

Arendt:

- Doppelverglasung theoretisch gut, praktisch schwer zu realisieren
- keine Empfehlung der Doppelverglasung da zu schlechte Erfahrungen, teilweise durch Ausbau
- Schäden im Leibungsbereich, mögliche Wärmebrücken
- Abhängig von dem Abstand der zweiten Verglasung
- Kondensationsprobleme

Reeb:

- Einbau von beheizten Fenstern (400 €/m²), aber bei andere Zielstellung, zum Schutz von mittelalterlichen Fenster vor Tauwasserausfall

Arendt:

- Mögliche Heizung der Fensterleibung oder der Fensterbank

17 Empfehlungen

Die Beheizung der Kirche ist in die Energieversorgung der Klosteranlage eingebunden. In der durch das Projekt initiierten Masterarbeit von Köhler (2008) „Energieversorgungskonzept für eine denkmalgeschützte Klosteranlage“, die an der HTWK Leipzig erstellt wurde, sind wichtige Hinweise zur Optimierung des Gesamtkonzepts erarbeitet worden. Eine energieeffiziente Beheizung in der Klosterkirche kann ausschließlich unter Berücksichtigung der ganzen Klosteranlage und seiner Energieverwaltung erfolgen. Daher kommt dem Energiemanagement in Zukunft eine wichtige Bedeutung zu.

Die Empfehlungen aus dem Projekt lassen sich grob in wenigen Punkten darstellen:

- Einsparung von Energie durch Absenkung der Grundtemperatur
- Gewährung von Behaglichkeit zu Zuführung der Wärme nah am Nutzer
- Weitere Einsparung durch sinnvollen und überschaubaren Einsatz von Steuer- und Regeltechnik

Vor den Erläuterungen zu den Empfehlungen zum Umbau der Beheizungsanlage in der Klosterkirche ist zunächst voraus zu schicken, dass Köhler (2008) den Einsatz der modernen Hackschnitzelfeuerung positiv bewertet. Daher sollte in Zukunft auch ein großer Teil der Beheizung der Klosterkirche darüber versorgt werden. Das findet bei der Planung Berücksichtigung. Teilweise können bestehende Elemente der derzeitigen Grundtemperierung übernommen werden. So kann die schmale Fußbodenheizung im Altarbereich bestehen bleiben, da ein Ausbau oder Umbau, beispielsweise durch eine Wärmedämmung unter der Rohrleitung, als sehr aufwendig und unverhältnismäßig eingeschätzt wird. Des Weiteren bleiben die Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore in Betrieb, da an diesen Bereichen keine gravierenden Schäden durch Verschmutzung nachweisbar sind. Zudem kann über diese Heizkörper ein Teil der zukünftig benötigten Energiemenge die dem Kirchenraum zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Grundtemperatur etwas abgesenkt und auf etwa 8°C gehalten wird. Hierdurch lässt sich ein großer Teil der Energieaufwendung einsparen. Die Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore gehören technisch überprüft und es sollten, wenn möglich, größere Heizkörper in Erwägung gezogen werden. Die Heizkörper, die direkt unter einem Fenster positioniert sind, können am ehesten bestehen bleiben. Die anderen Heizkörper in der Klosterkirche sollten zurückgebaut werden. Die Heizmenge von diesen Stellen trug in den vergangenen Jahren sehr zur intensiven Verschmutzung bei und vermutlich nur zu geringeren Anteilen zur Behaglichkeit der Nutzer. Die Temperierung des Chorgestühls erfolgt aus einem neu zu planenden Podest in der Höhe einer normalen Stufe. In diesem Podest muss durch einen versierten Heizungsplaner eine optimale Fußbodenheizung integriert werden. Material und Bauweise des Podestes sind Planungsleistungen der Umsetzungsphase. Dabei wird eine große Verbesserung der derzeitigen Situation an dieser Stelle erreicht. Das Chorgestühl kann durch weitere Anbauten, wie Türen und einer Rückwand erheblich aufgewertet werden. Da die Heizleistung aus den Heizkörpern auf der Chorgasse und der Fußbodenheizung im Chorgestühl nicht ausreicht, um die geplanten +8°C Grundtemperatur auch im Winter stabil zu halten, müssen weitere Wärmeabgabestellen in der Klosterkirche verteilt werden. Ein besonderes Augenmerk lag bei den raumklimatischen Untersuchungen bei der Behaglichkeitsmessung in den Besucherreihen. In diesem bisher nicht beheizten Bereich sollte neu ein Teil der Wärme nah an den Nutzern eingebracht werden. Hierfür kommt eine modifizierte warmwassergeführte Bodenkanalheizung unter den Kniebrettern in Frage. Die Bankreihen stehen auf einem ca. 8 cm hohen Holzpodest, so dass die neue Rohrführung keine umfangreichen Arbeiten an dem Granitfußboden erforderlich macht. Je nach Erfordernis kann es sinnvoll sein einzelne Bankreihen zu Heizblöcken zusammenzufassen, um diese dann je nach Raumtemperatur oder Anforderung an eine teilweise erhöhte Temperatur einzeln ansteuern zu können. Auch hier kann erst eine detaillierte Fachplanung in der Umsetzungsphase erfolgen. Durch ein Beheizungsmanagement kann die Energieaufwendung gut gesteuert und optimal eingesetzt werden. So wird die Bankbeheizung in den ersten vier Bankreihen täglich betrieben. Alle restlichen Bankreihen werden nur zur Stabilisierung der Grundtemperatur und am Sonntag bei Benutzung zugeschaltet.

Ziel der bisherigen Empfehlungen zur Beheizung der Klosterkirche betraf die Sicherstellung der Grundtemperierung des Raumes. Durch das Absenken der Raumlufttemperatur im Winter von derzeit ca. $+12^{\circ}\text{C}$ auf geplante $+8^{\circ}\text{C}$ kann es an bauphysikalisch gefährdeten Stellen zu Tauwasserbildung kommen. Diese gefährdeten Bereiche konnten durch die raumklimatischen Untersuchungen dem Sockelbereich der Nordwand, den Fensterflächen und dem Gewölbe zugeordnet werden. Für diese Bereiche sollten entsprechende Maßnahmen geprüft und baulich umgesetzt werden. So ist für den Sockelbereich der Nordwand der Einsatz einer Sockeltemperierung zu prüfen. Dies kann in der Umsetzungsphase rechnerisch durch eine Simulationsrechnung auf Basis der raumklimatisch erfassten Daten erfolgen. Für das Gewölbe ist der Einsatz einer Gewölbedämmung zur Vermeidung des Risikos von Tauwasserausfall zu prüfen. Durch die Verhinderung von Tauwasserausfall auf der Oberfläche des Gewölbes, kann die erneute Verschmutzung stark abgemindert werden. Die weniger verschmutzten, massiven und damit wärmeren Gewölbezwickel unterstützen die Richtigkeit dieser Schlussfolgerung. Die bauphysikalisch schwächsten Bauteile in der Klosterkirche stellen die großen Fensterflächen dar. Hier kommt es durch die Einfachverglasung zu einem größeren Tauwasserausfall und durch die geringe Oberflächentemperatur der Glasscheiben zu den messtechnisch dokumentierten Fallwinden, die für das Unbehaglichkeitsgefühl der Besucher verantwortlich sind. Hier müssen weitere Untersuchungen eingeplant werden, da im eben beendeten Projekt Mittel für eine probeweise Umsetzung nicht eingeplant waren. Das Ziel muss bei einer kontrollierten Temperierung dieser Flächen liegen, um die Oberflächentemperaturen je nach Bedarf anzuheben. Um Heizenergie einzusparen aber auch um eine optimale Lokalterperierung in der Klosterkirche zu gewährleisten, müssen die vorgestellten einzelnen Heizsysteme der Kirche separate Heizkreisläufe bekommen, um jeden dieser Bereiche gesondert ansteuern zu können. So kann in der Übergangszeit zum Winter je nach Bedarf ein weiterer Heizkreis dazugeschaltet werden. Der Organist kann durch eine elektrisch betriebene Beheizung an seinem Platz oberhalb der Gemeinde versorgt werden. Ein Warmwasserbeheizungsanschluss erscheint vom Installationsaufwand und der Regelstrategie hier nicht sinnvoll.

18 Literaturverzeichnis

- Arendt, C. (1993) Raumklima in großen historischen Räumen : Heizungsart, Heizungsweise, Schadensentwicklung, Schadensverhinderung, Verlag Rudolf Müller, Köln, 152 S.
- Bauer, M. (1998) Die zwei Gründungen des Klosters St. Marienstern. in: 750 Jahre Kloster St. Marienstern, Festschrift, Halle, hrsg. v. Blaschke, Karlheinz
- Camuffo et al. (2006) Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali : guida all' analisi dei pro e dei contro dei vari sistemi di riscaldamento = Church heating and the preservation of the cultural heritage : guide to the analysis of the pros and cons of various heating systems [red.: Gail Swerling ; Barbara Travaglini. Authors: Dario Camuffo; Emanuela Pagan; Alexandra Troi] - Milano: Electa, 2006. - 239 p.: ill. ISBN 978-88-370-5035-1 - Risultati del progetto Europeo Friendly-Heating (EVK4-CT-2001-00067)
- Camuffo, D. (1998) Microclimate for Cultural Heritage. Developments in Atmospheric Science 23, Elsevier, Amsterdam, ISBN 0444829253, 415 S.
- Dehio, G. (1996) Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Sachsen I, Regierungsbezirk Dresden, Deutscher Kunstverlag München
- <http://www.umweltanalytik.com/ing11.htm>
- Köhler, D. (2008) Energieversorgungskonzept für eine denkmalgeschützte Klosteranlage, Masterarbeit an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH), Fachbereich Maschinen und Energietechnik, 124 S.
- Limpens-Neilen, D. (2006) Bench Heating in Monumental Churches, Thermal Performance of a Prototype, Bouwstenen issue 112, Eindhoven University Press, Eindhoven, The Netherlands.
- Muß, C. (1994) Beschreibung des „Non Standard TRNSYS-Types“ „Wasserdampfdiffusion in Festkörpern“
- Recknagel, Sprenger, Schramek (1997) Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik 97/98 S.996
- Riedel, F. (1965) Untersuchungsberichte zur Fassung der Raumschale, Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Dokumentationsarchiv
- Stephani, Rolf; Püschmann, Gabriel; Malz, Siegfried (2007) Kirchenheizung Erfahrungen und Ansprüche an die Planung, Nutzung und Betreibung im Bereich der Evangelisch-Lutherischen Landeskirche Sachsen.
- Winzeler, M. (2008) St. Marienstern, der Stifter, das Kloster, sein Heiligtum und die Kunst Mitteleuropas im 13. Jahrhundert, Dissertation TU-Berlin.

Anlagen

Diagramme zur raumklimatischen Untersuchung

- Diagramm 1: Vergleich Raumklima im Kirchenschiff mit Außenklima
(Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008)
- Diagramm 2: Raumklima im Kirchenschiff Mittelteil
(Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)
- Diagramm 3: Raumklima an der Außenwand Nordseite
(Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)
- Diagramm 4: Raumklima an der Außenwand zum Kreuzgang
(Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)
- Diagramm 5: Vergleich der Oberflächentemperaturen von Nordseite, Mittelteil, Südseite
(Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)
- Diagramm 6: Vergleich der Raumlufttemperaturen im Kirchenschiff in unterschiedlichen Höhen
(Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)
- Diagramm 7: Vergleich der Taupunkttemperatur der Raumluft mit der Oberflächentemperatur der Fenster
- Diagramm 8: Vergleich der absoluten Luftfeuchte Innen und Außen
(Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008)
- Diagramm 9: Vergleich der absoluten Luftfeuchte Innen und Außen
(Zeitraum: 02.05.2008 - 13.05.2008)
- Diagramm 10: Messung vertikale Luftströmung unterhalb Fenster
(Zeitraum: 18.02.2008 - 28.02.2008)
- Diagramm 11: Messung vertikale Luftströmung unterhalb Fenster
(Zeitraum: 22.02.2008 - 28.02.2008)
- Diagramm 12: Messung der horizontalen Luftströmung am Chorgestühl links
(Zeitraum: 18.02.2008 - 11.03.2008)
- Diagramm 13: Behaglichkeitsmessung in Besucherreihen
(Zeitraum: 22.02.2008 - 27.02.2008)
- Diagramm 14: CO₂ - Messung zur Luftwechselrate
(Zeitraum: 31.07.2007 - 20.06.2008)
- Diagramm 15: CO₂ - Messung zur Luftwechselrate
(Zeitraum: 20.03. - 26.03.2008)

Zeichnungen

Zeichnung 1: Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit den Messpunkten der Raumklimamessung

Zeichnung 2: Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern mit dem bestehenden Heizsystem

Zeichnung 3: Grundriss und Schnitt der Klosterkirche St. Marienstern visualisierte Luftbewegung in der Klosterkirche (vereinfacht dargestellt)

technische Zeichnungen

Musterbank System Brettschneider

Musterbank System Candor

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Messort: Marienstern - Raumklima	
Bedingungen: Diagramm Mar_Kl_Fi_2			
Kommentar: Vergleich Raumklima im Kirchenschiff mit Außenklima (Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008)			
rot	- Raumlufttemperatur	Datum:	25.09.2008
grün	- relative Luftfeuchte Raumluft	Startzeit:	03.03.2006 15:00:00
orange	- Lufttemperatur Außen	Endezeit:	21.08.2008 12:15:00
hellgrün	- relative Luftfeuchte Außen	Kanäle:	4 (5)
		Meßpunkte:	49906
		MAR_FI~1 K:1 °C	
		MAR_FI~1 K:2 %rF	
		MAR_AU~2 K:1 °C	
		MAR_AU~2 K:2 %rF	

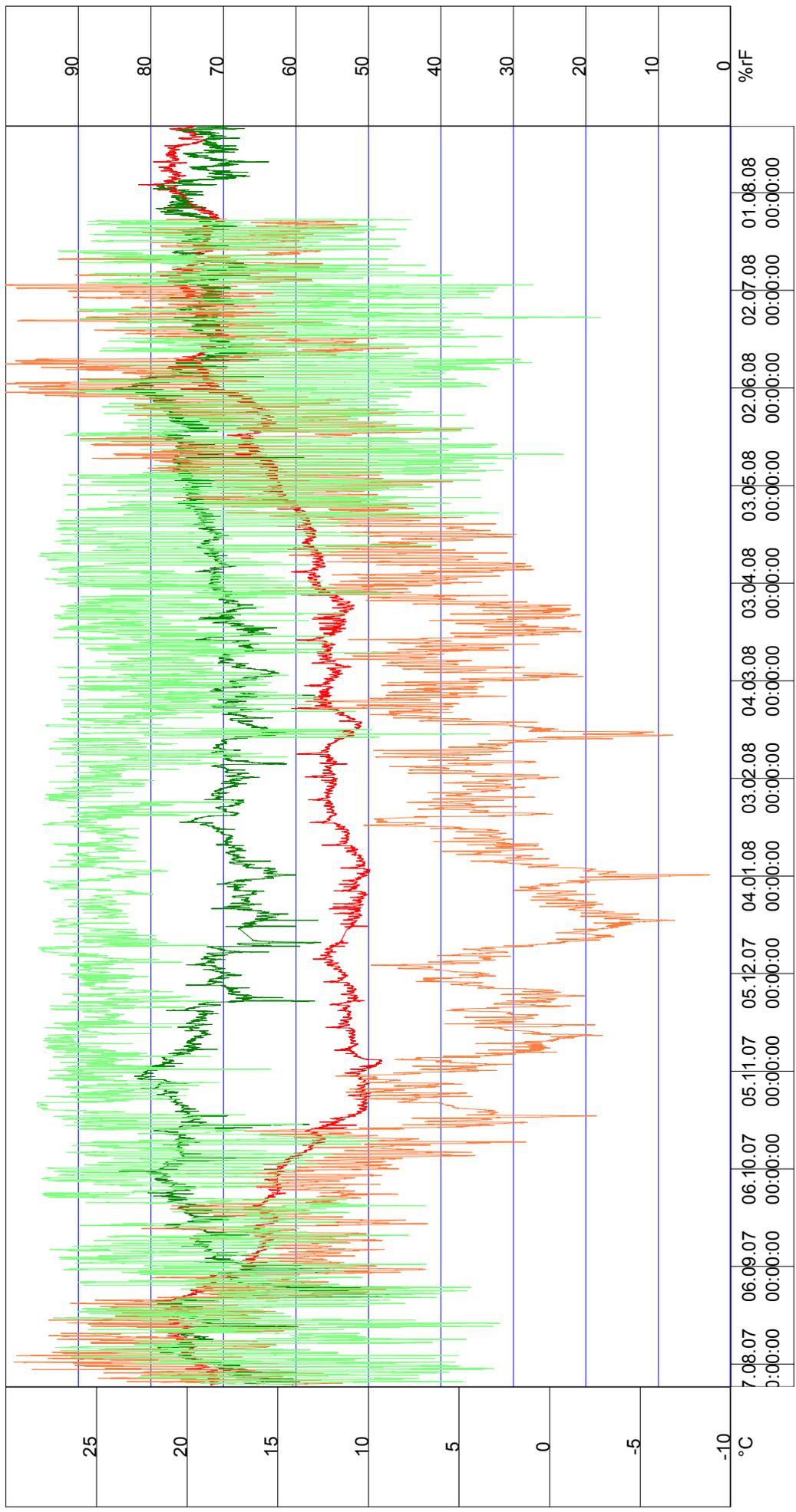


Diagramm 1

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Messort: Marienstern - Raumklima, Kirchenschiff	
Bedingungen: Diagramm Ma_Kl_Mi_1		MAR_MI~1 K:1 °C	
Kommentar: Raumklima im Kirchenschiff Mittelteil (Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)		MAR_MI~1 K:2 °C	
rot	- Raumlufttemperatur	MAR_MI~1 K:3 °C	
grün	- relative Luftfeuchte Raumluft	MAR_MI~1 K:4 %rF	
hellblau	- Oberflächentemperatur Fußboden		
lila	- Oberflächentemperatur Pfeiler		
Datum: 23.09.2008			
Startzeit:31.07.2007 18:00:00			
Endezeit:24.07.2008 14:00:00			
Kanäle:4 (4)			
Messpunkte:34440			

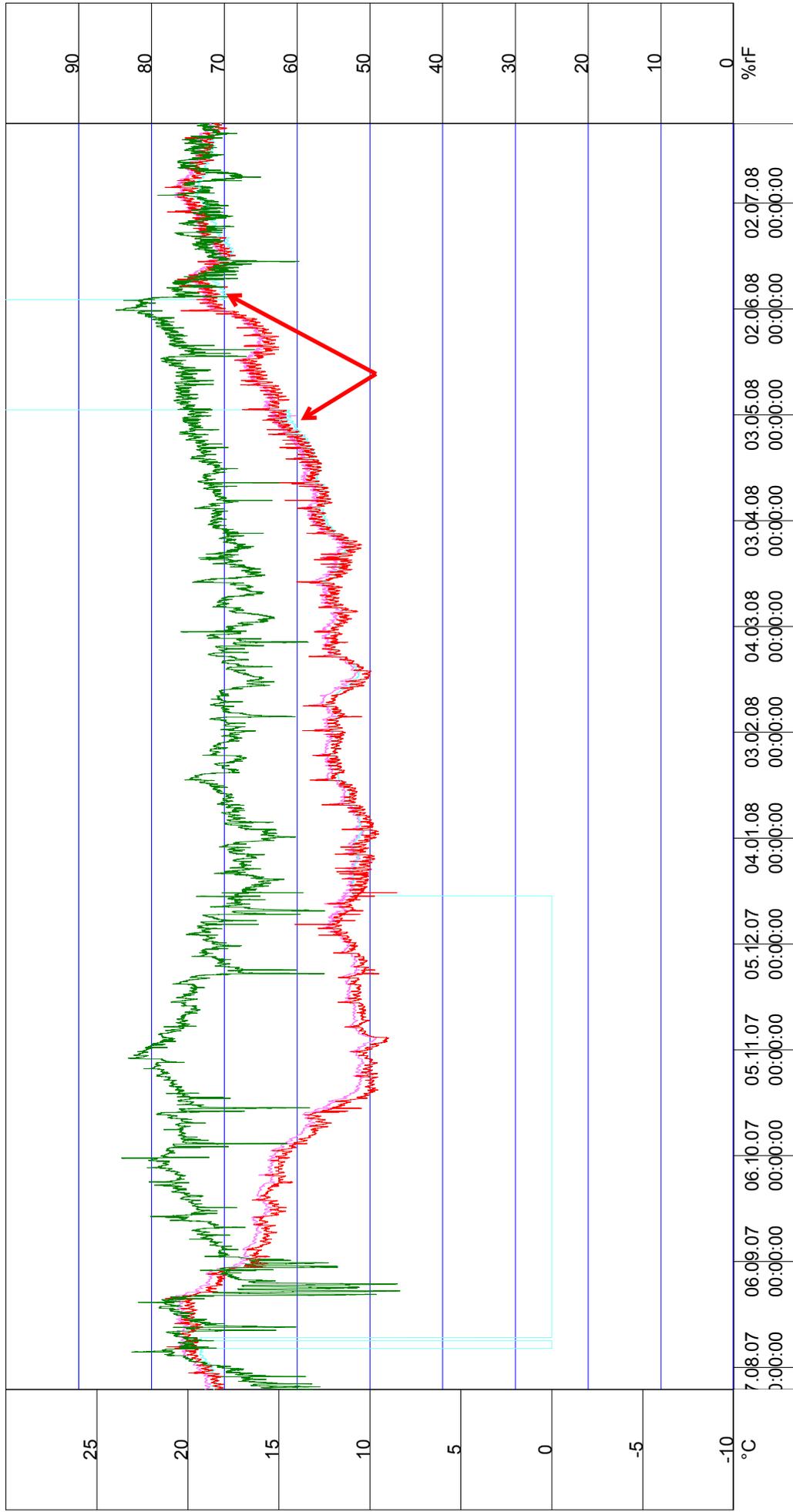


Diagramm 2

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Messort: Marienstern - Raumklima, Außenwand Nordseite	MAR_LI~1 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_KI_No_1		MAR_LI~1 K:2 %rF
Kommentar: Raumklima an der Außenwand Nordseite		MAR_LI~1 K:3 °C
rot - Raumlufttemperatur	Datum: 23.09.2008	
grün - relative Luftfeuchte Raumluft	Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
blau - Oberflächentemperatur Außenwand Nordseite	Endezeit:24.07.2008 14:00:00	
	Kanäle:3 (3)	
	Meßpunkte:34444	

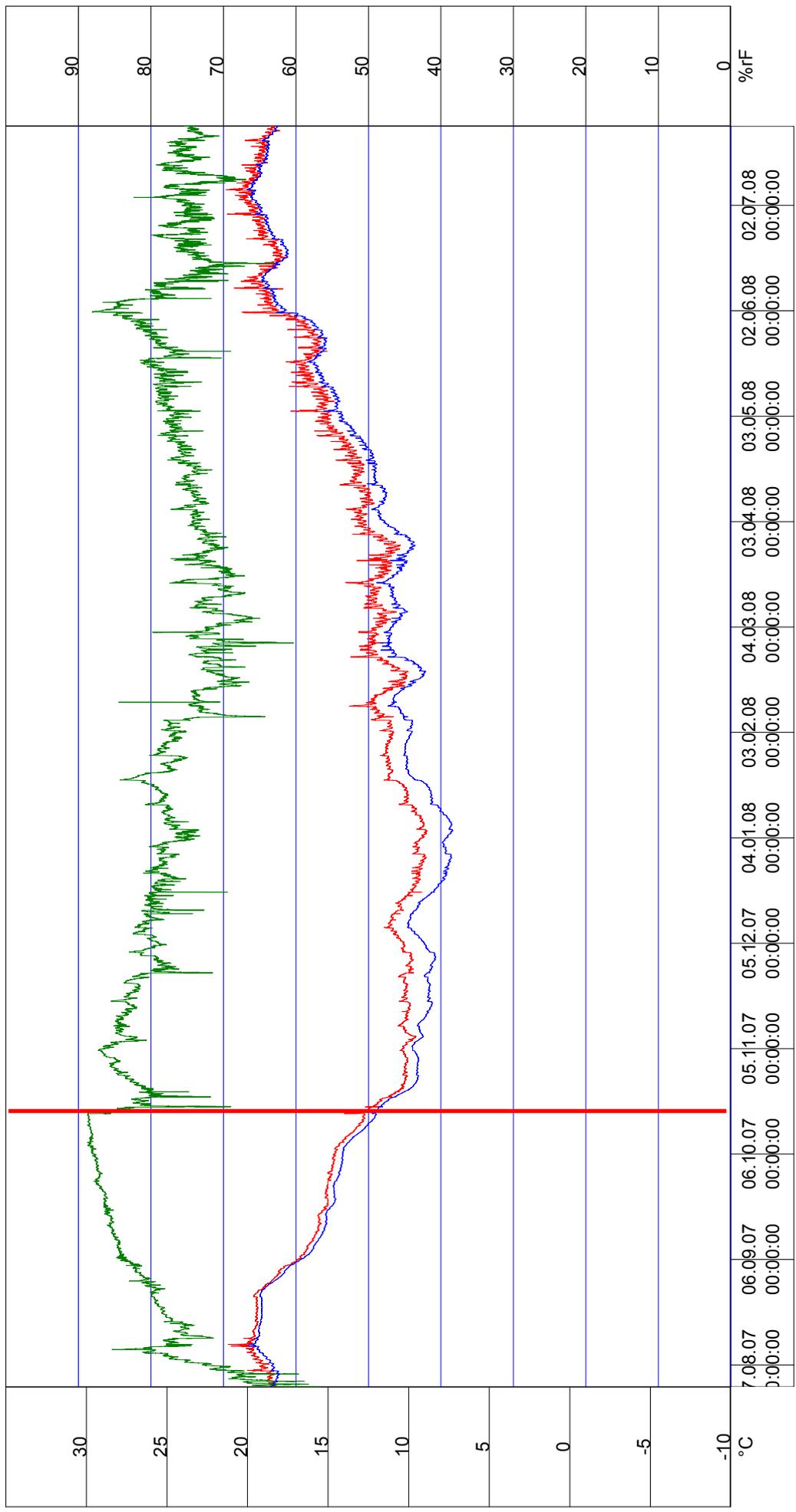


Diagramm 3

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Messort: Marienstern - Raumklima, Außenwand Südseite	MAR_RE~1 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Kl_Sü_1		MAR_RE~1 K:2 °C
Kommentar: Raumklima an der Außenwand zum Kreuzgang (Zeitraum: 31.07.2007 - 17.07.2008)	Datum: 23.09.2008	MAR_RE~1 K:3 °C
rot - Raumlufttemperatur	Startzeit:31.07.2007 18:00:00	MAR_RE~1 K:4 %rF
grün - relative Luftfeuchte Raumluft	Endezeit:24.07.2008 13:45:00	
hellblau - Oberflächentemperatur Außenwand zum geschlossenen Kreuzgang	Kanäle:4 (4)	
lila - Oberflächentemperatur im Chorgestühl	Meßpunkte:34443	

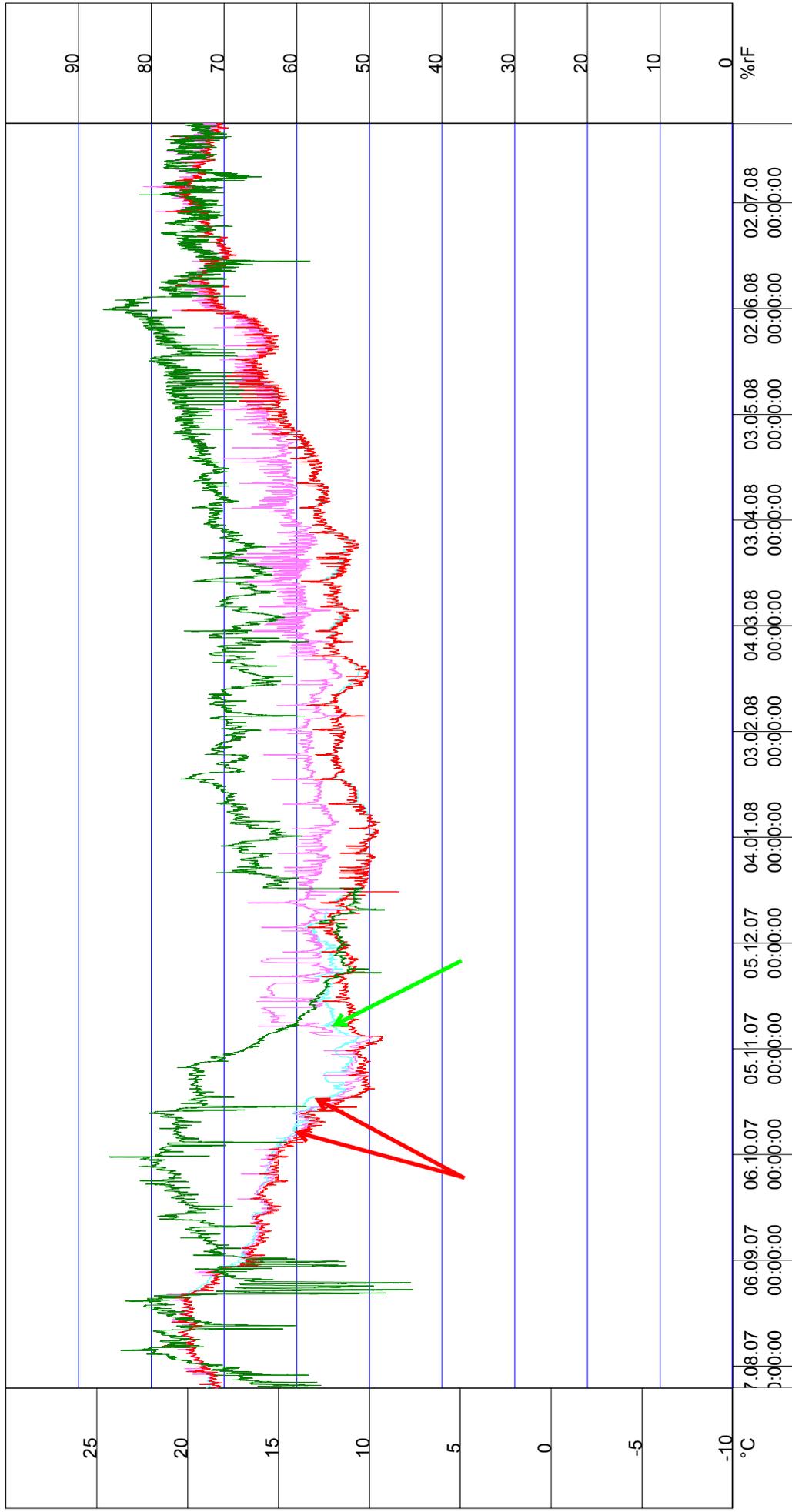


Diagramm 4

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Meßort: Marienstern - Oberflächentemperaturen	MAR_RE~1 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Ob_1		MAR_MI~1 K:1 °C
Kommentar: Vergleich der Oberflächentemperaturen von Nordseite, Mittelteil, Südseite	Datum: 23.09.2008	MAR_LI~1 K:3 °C
rot - Oberflächentemperatur Nordseite, Außenwand	Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
grün - Oberflächentemperatur Mittelteil, Pfeiler	Endezeit:24.07.2008 13:45:00	
blau - Oberflächentemperatur Südseite, Kreuzgang	Kanäle:3 (4)	
	Meßpunkte:34443	

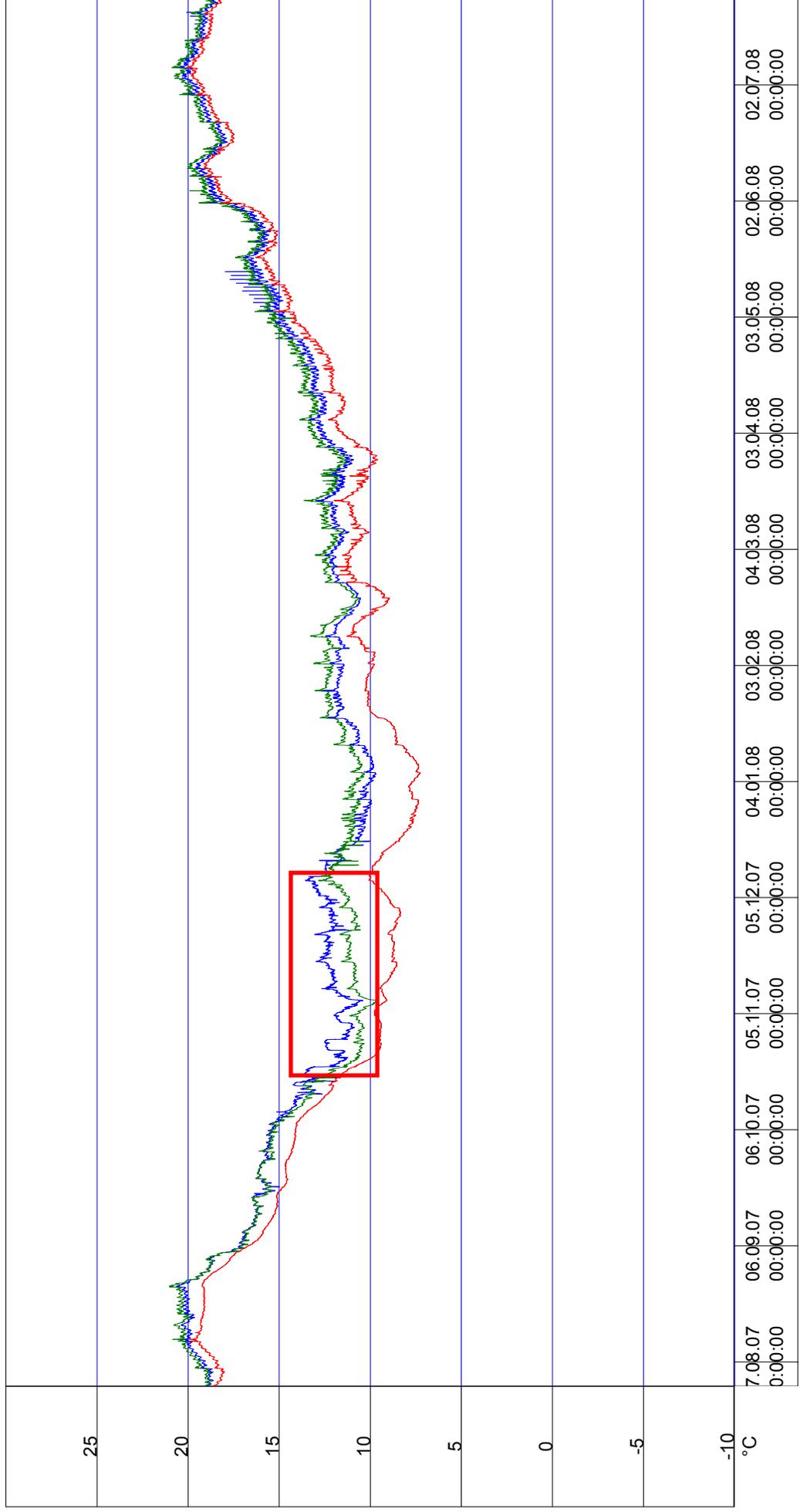


Diagramm 5

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Meßort: Marienstern - Raumlufttemperaturen	MAR_MI~1 K:3 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Tem_1		MAR_GE~1 K:1 °C
Kommentar: Vergleich der Raumlufttemperaturen im Kirchenschiff in unterschiedlichen Höhen		MAR_GE~1 K:3 °C
rot - Raumlufttemperatur in 1,50 m Höhe	Datum: 23.09.2008	
blau - Raumlufttemperatur in ca. 10 m Höhe	Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
grün - Raumlufttemperatur in ca. 17,40 m Höhe	Endezeit:24.07.2008 14:00:00	
	Kanäle:3 (4)	
	Meßpunkte:34440	

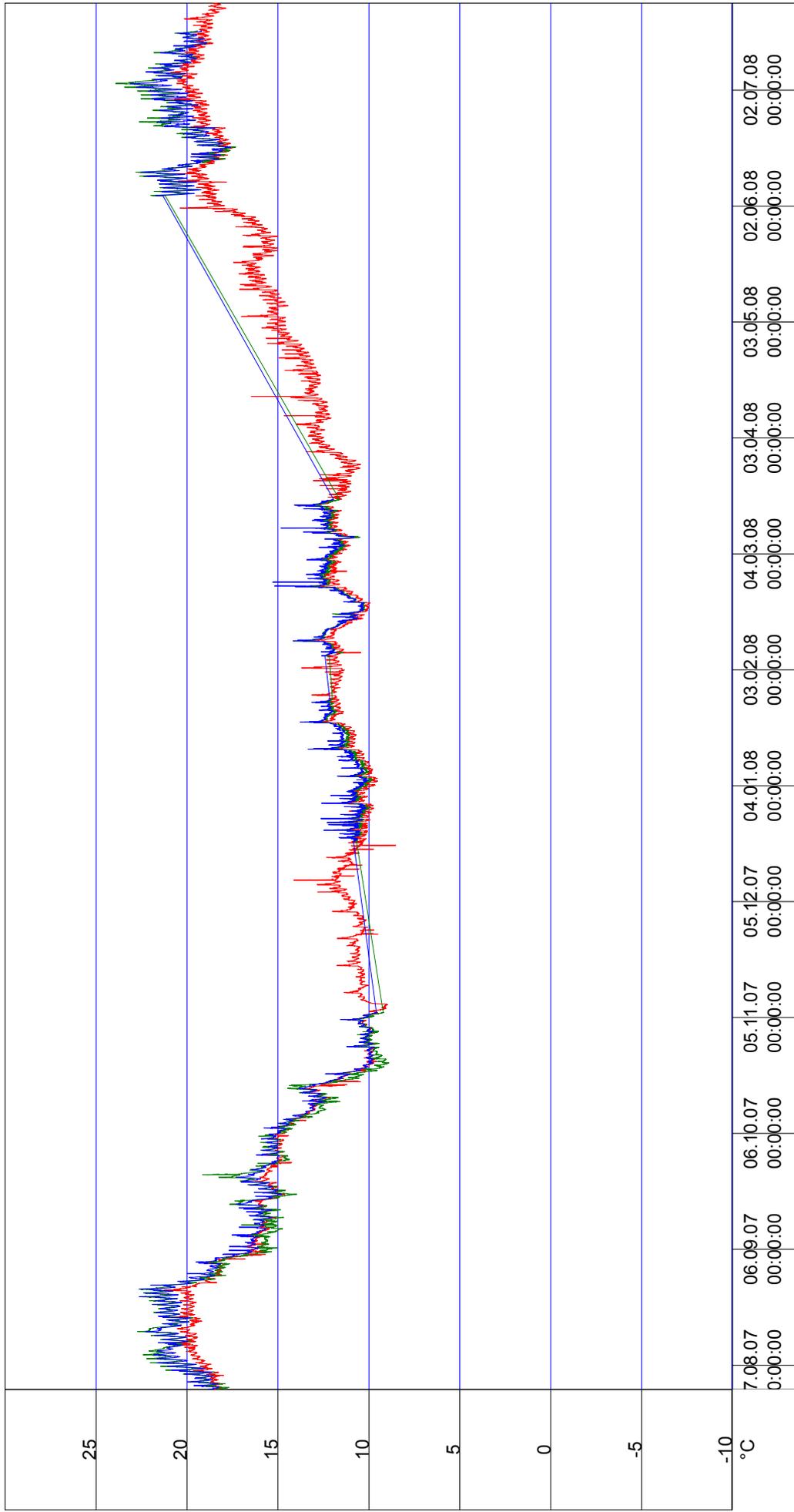


Diagramm 6

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Mefsort: Marienstern - Raumklima	
Bedingungen: Diagramm Ma_Tau.Temp_1			
Kommentar: Vergleich der Taupunkttemperatur der Raumluft mit der Oberflächentemperatur der Fenster			
rot - Raumlufttemperatur		MAR_MI~1 K:1 °C	
grün - relative Luftfeuchte Raumluft		MAR_MI~1 K:2 %F	
blau - Oberflächentemperatur Fenster		MAR_MI~1 K:3 °C	
lila - Taupunkttemperatur der Raumluft		MAR_MI~1 K:4 td °C	
Datum: 25.09.2008			
Startzeit:18.12.2007 16:15:00			
Endezeit:24.07.2008 13:30:00			
Kanäle:4 (4)			
Meßpunkte:21010			

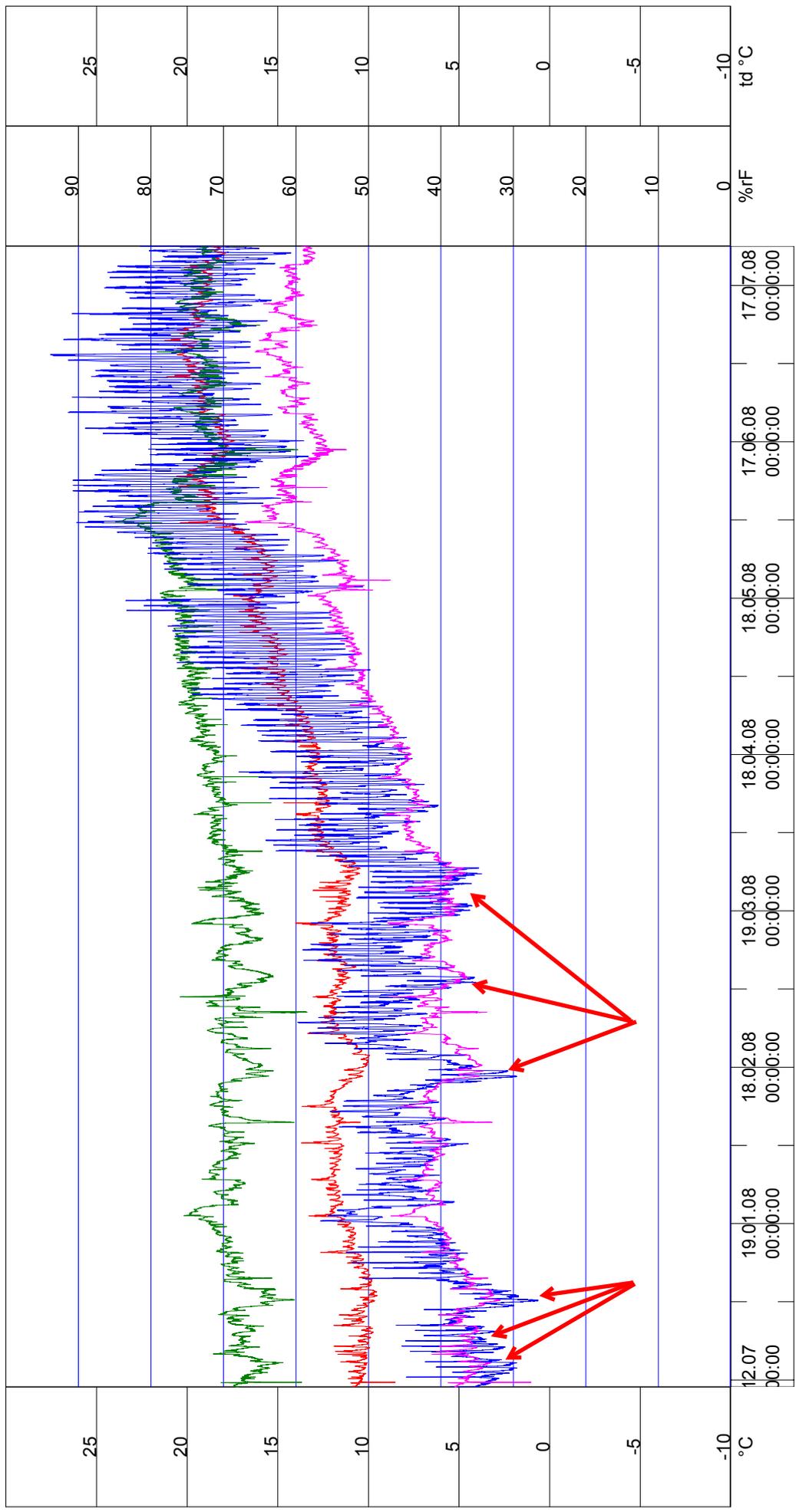


Diagramm 7

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Mefsort: Marienstern - Raumklima		MAR_AU~2 K:3 g/m3	
Bedingungen: Diagramm Mar_KI_Fi_3				MAR_FI~1 K:6 g/m3	
Kommentar: Vergleich der absoluten Luftfeuchte Innen und Außen (Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008)					
rot		- absolute Luftfeuchte Außen		Datum: 25.09.2008	
grün		- absolute Luftfeuchte Innen		Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
				Endezeit:23.07.2008 22:45:00	
				Kanäle:2 (3)	
				Meßpunkte:19258	

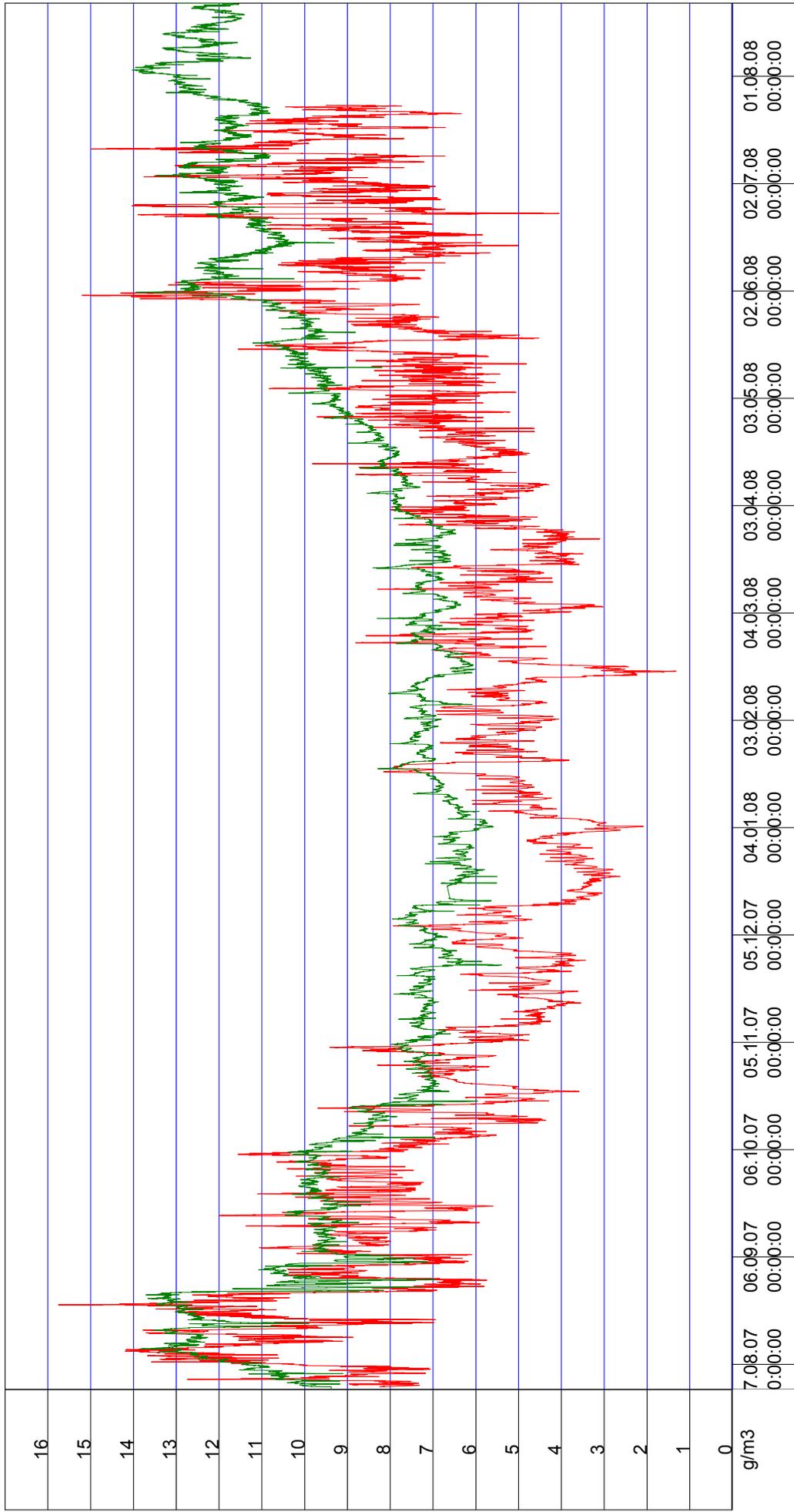


Diagramm 8

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Mefsort: Marienstern - Raumklima		MAR_AU~2 K:3 g/m3
Bedingungen: Diagramm Mar_KI_Fi_4				MAR_FI~1 K:6 g/m3
Kommentar: Vergleich der absoluten Luftfeuchte Innen und Außen (Zeitraum: 02.05.2008 - 13.05.2008)				
rot		- absolute Luftfeuchte Außen		
grün		- absolute Luftfeuchte Innen		
Datum: 25.09.2008				
Startzeit:31.07.2007 18:00:00				
Endezeit:23.07.2008 22:45:00				
Kanäle:2 (3)				
Meßpunkte:19258				

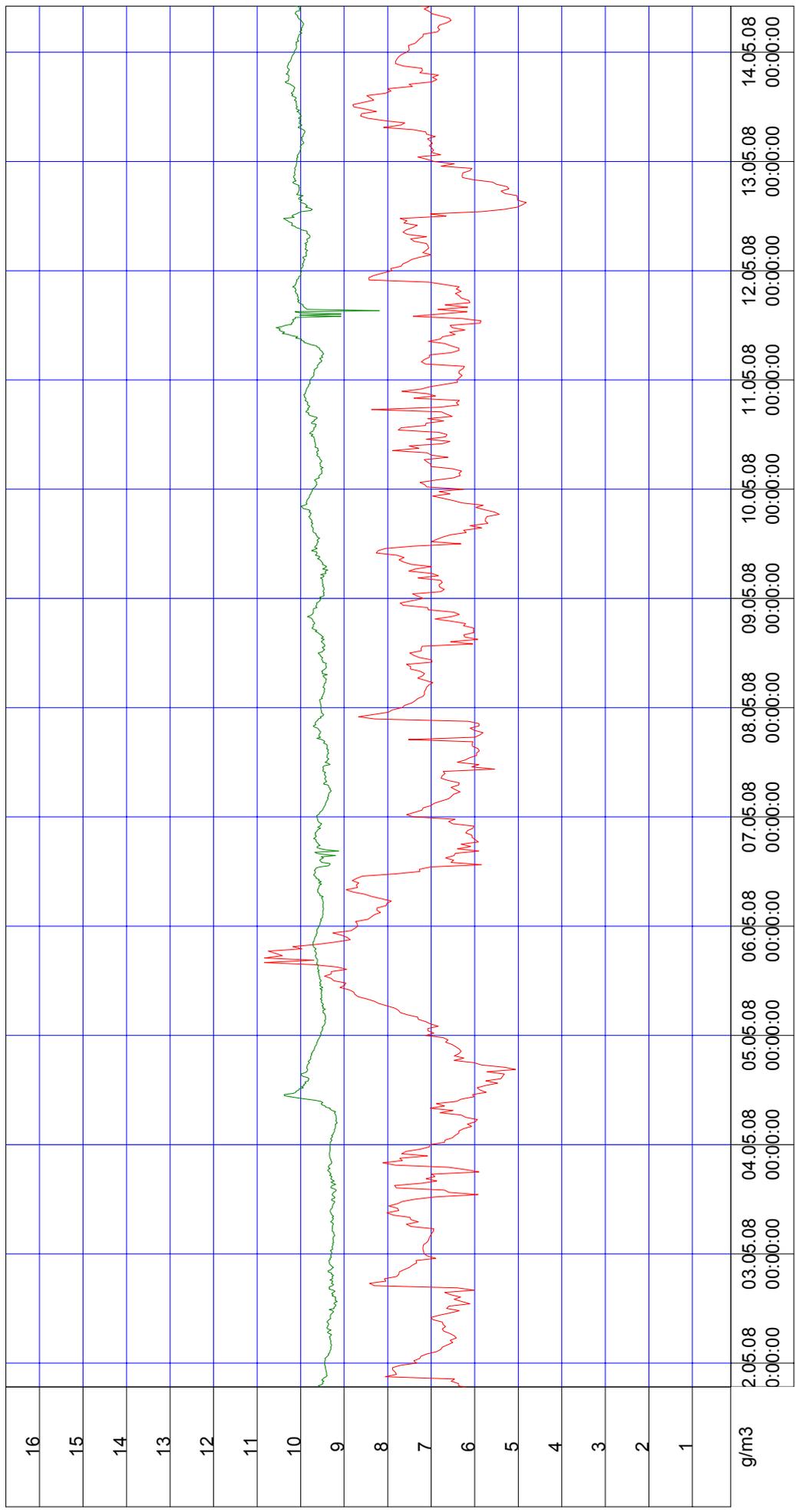


Diagramm 9

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Mefsort: Marienstern - Messung Luftströmung		MAR_AU~2 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Lu_2				MAR_LU~2 K:2 m/s
Kommentar: Messung vertikale Luftströmung unterhalb Fenster		Datum: Datum		MAR_LU~2 K:1 °C
Zeitraum: 18.02.2008 - 28.02.2008		Startzeit: 31.07.2007 18:00:00		
rot - Außenlufttemperatur		Endezeit: 23.07.2008 22:45:00		
grün - vertikale Luftströmung		Kanäle: 3 (2)		
blau - Raumlufttemperatur		Meßpunkte: 19258		

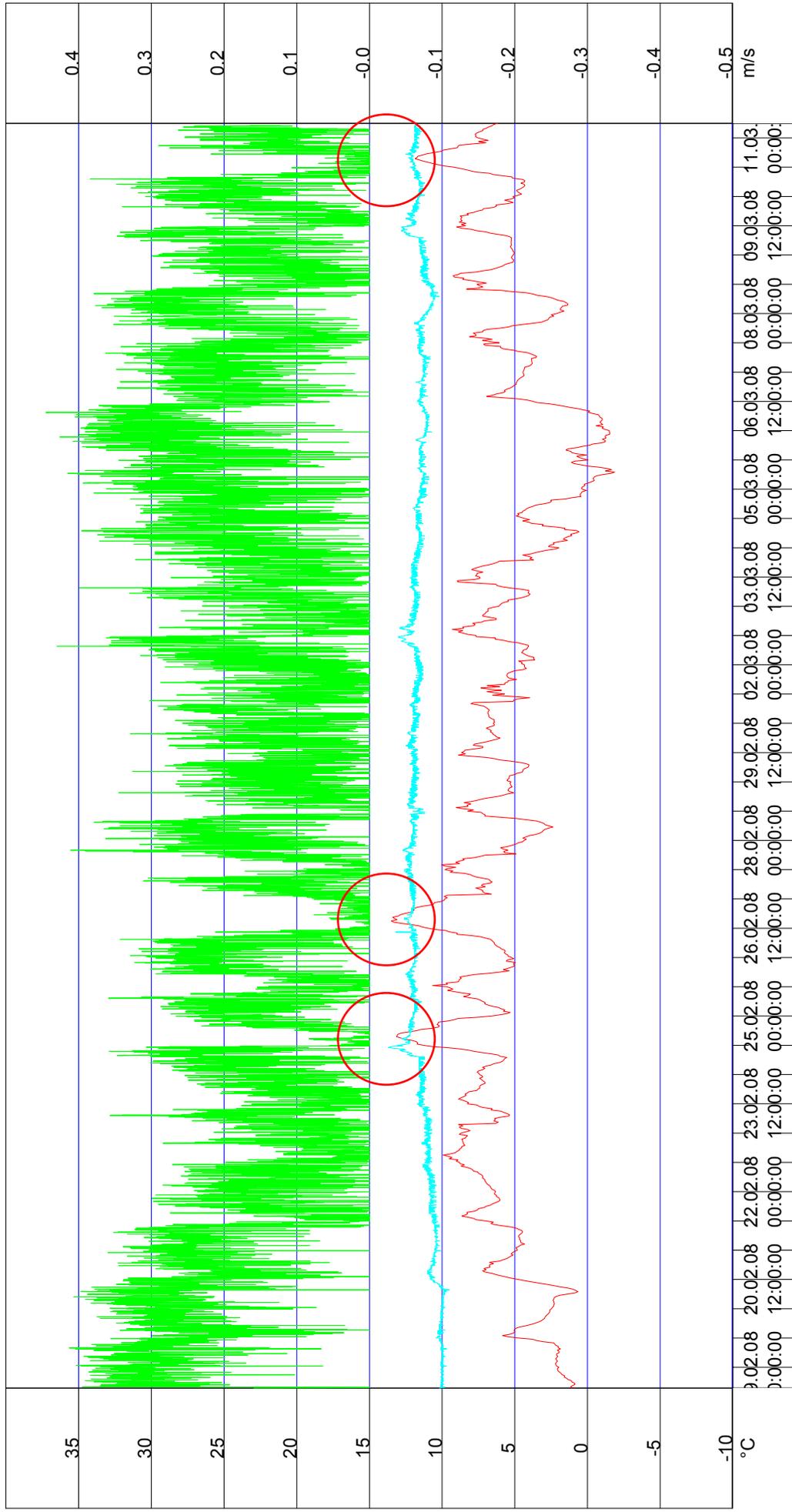


Diagramm 10

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Messort: Marienstern - Messung Luftströmung		MAR_AU~2 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Lu_2				MAR_LU~2 K:2 m/s
Kommentar: Messung vertikale Luftströmung unterhalb Fenster		Datum:		MAR_LU~2 K:1 °C
Zeitraum: 22.02.2008 - 28.02.2008		Startzeit:31.07.2007 18:00:00		
rot - Außenlufttemperatur		Endezeit:23.07.2008 22:45:00		
grün - vertikale Luftströmung unter Fenster		Kanäle:3 (2)		
blau - Raumlufttemperatur		Meßpunkte:19258		

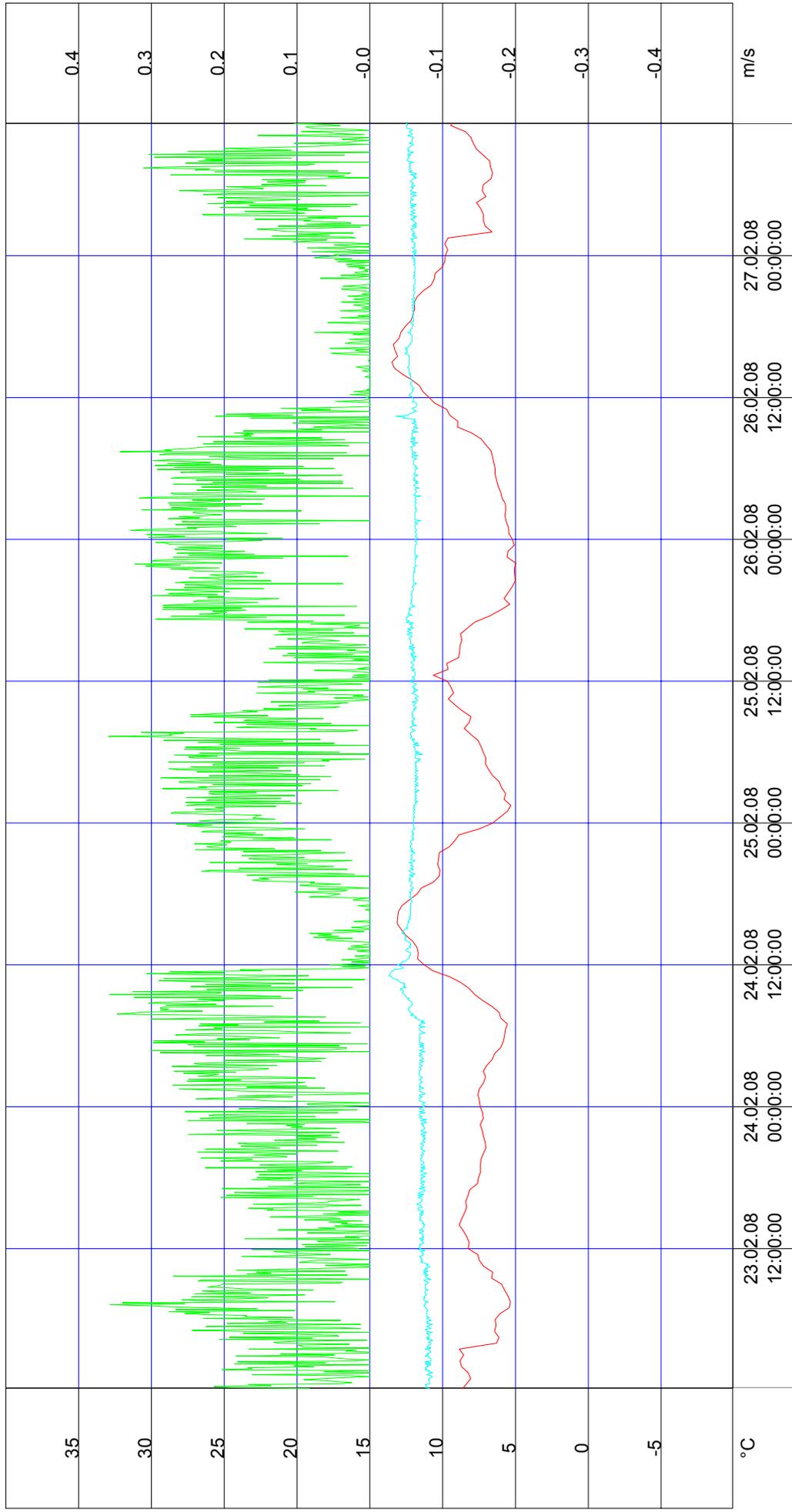


Diagramm 11

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Messort: Marienstern - Messung Luftströmung	MAR_LU~2 K:3 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_Lu_3		MAR_LU~2 K:4 m/s
Kommentar: Messung der horizontalen Luftströmung am Chorgestühl links		
Zeitraum: 18.02.2008 - 11.03.2008		
grün - horizontale Luftströmung		
blau - Raumlufttemperatur		
Datum: 09.12.2008		
Startzeit: 20.12.2007 13:15:00		
Endezeit: 11.03.2008 05:05:00		
Kanäle: 2 (4)		
Meßpunkte: 16071		

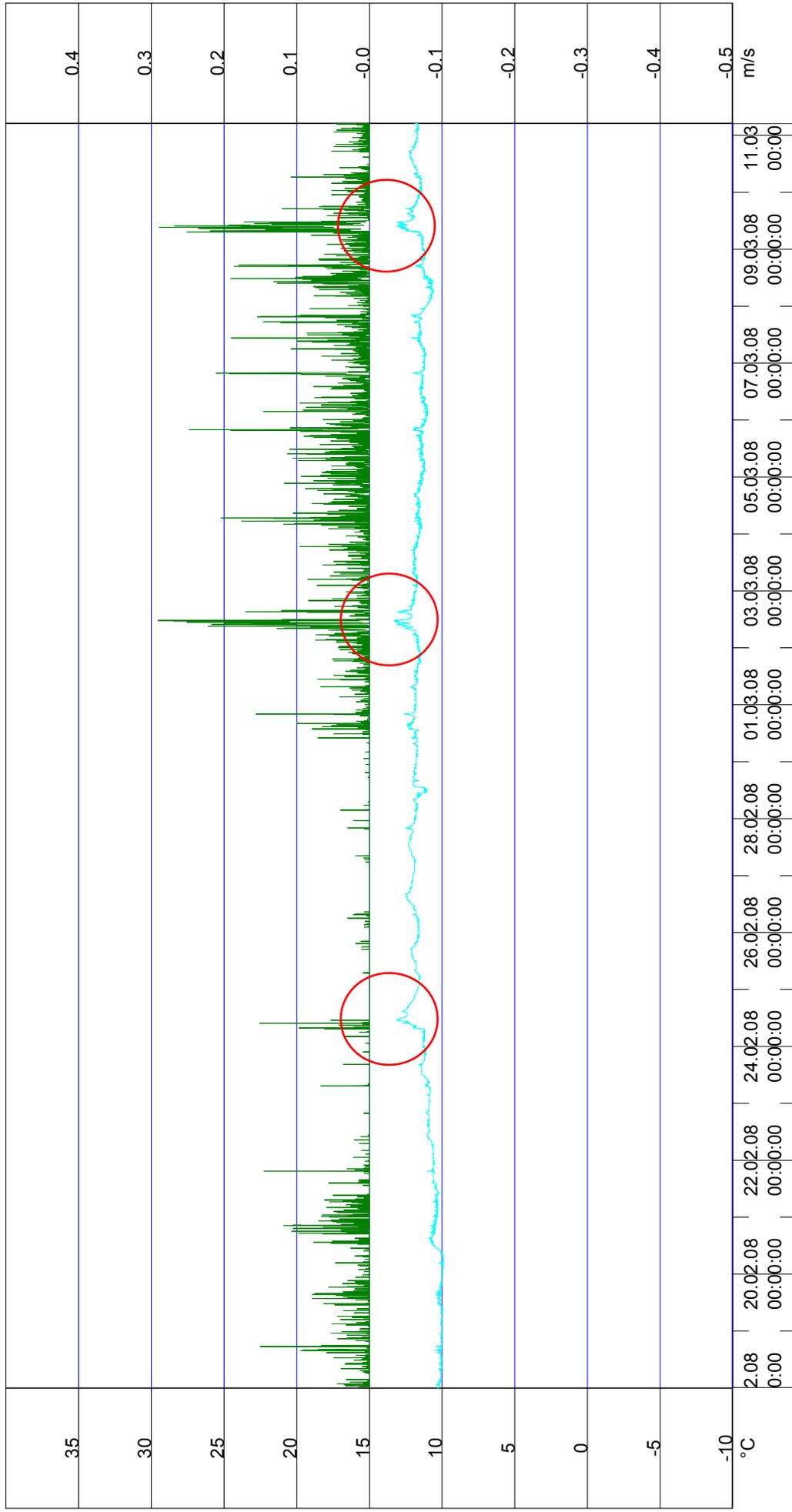


Diagramm 12

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Messort: Marienstern - Messung Behaglichkeit	
Bedingungen: Diagramm Ma_Beh_1		1601-0~1 K:1 °C	
Kommentar: Behaglichkeitsmessung in Besucherreihen		1601-0~1 K:3 m/s	
Zeitraum: 22.02.2008 - 27.02.2008		Datum: 13.12.2008	
rot - Raumlufttemperatur Besucherreihen		Startzeit:16.01.2008 10:15:00	
grün - Luftgeschwindigkeit (ungerichtet) Besucherreihen		Endezeit:03.04.2008 14:15:00	
		Kanäle:2 (7)	
		Messpunkte:7699	

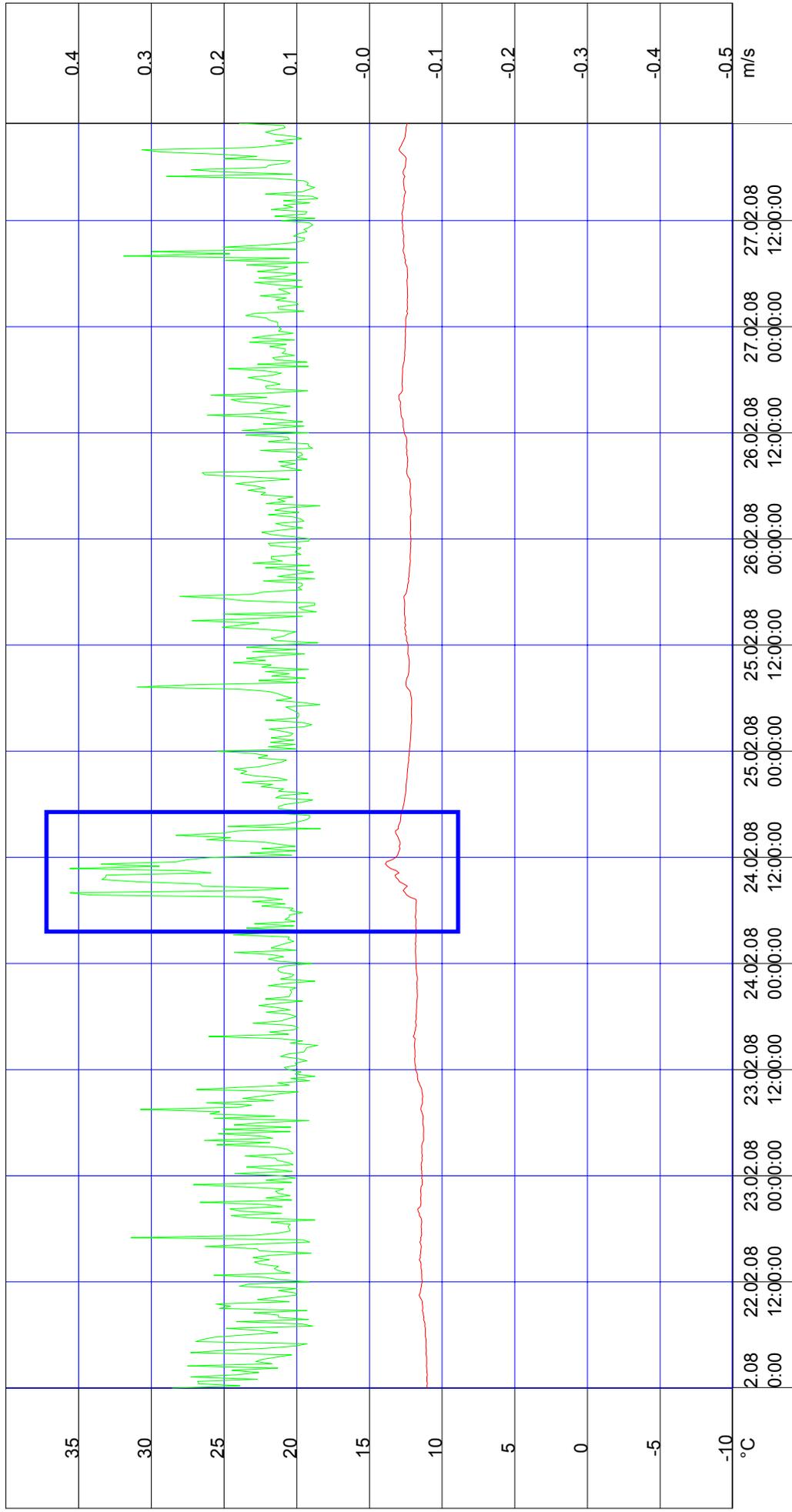


Diagramm 13

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5		Messort: Marienstern - CO2 Messung Luftwechsel	
Bedingungen: Diagramm Ma_CO2_1			
Kommentar: CO2 - Messung zur Luftwechselrate (Zeitraum: 31.07.2007 - 20.06.2008)			
rot - Raumlufttemperatur		Datum: 10.09.2008	
grün - relative Luftfeuchte Raumluft		Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
blau - CO2 Gehalt der Raumluft		Endezeit:20.06.2008 15:47:00	
		Kanäle:3 (3)	
		Meßpunkte:27823	
		CO2_M_~1 K:1 °C	
		CO2_M_~1 K:2 %rF	
		CO2_M_~1 K:3 ppm	

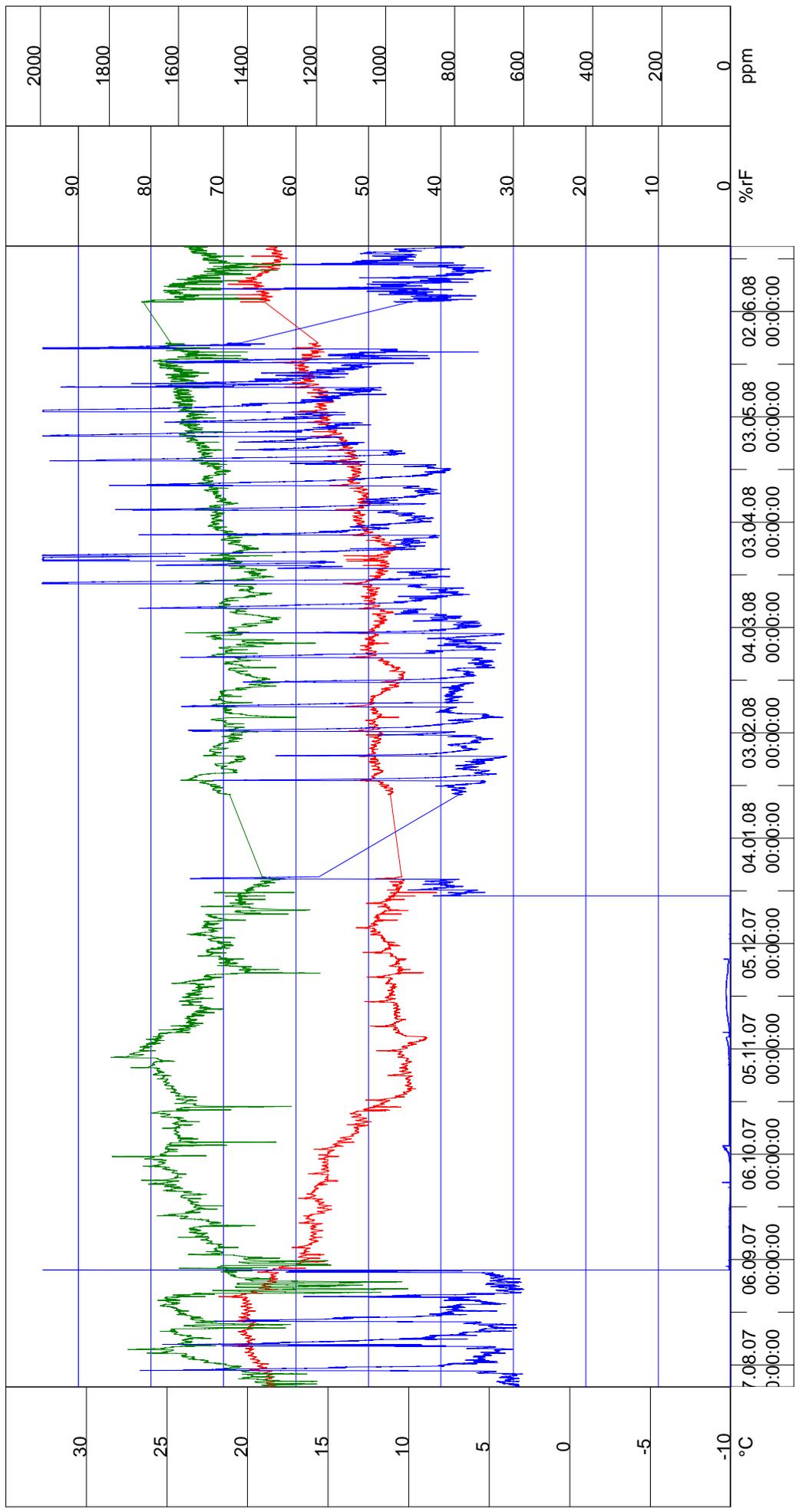


Diagramm 14

Comfort-Software V2.5: Comfort-Software V2.5	Messort: Marienstern - CO2 Messung Luftwechsel	CO2_M_~1 K:1 °C
Bedingungen: Diagramm Ma_CO2_2		CO2_M_~1 K:2 %rF
Kommentar: CO2 - Messung zur Luftwechselrate (Zeitraum: 20.03. - 26.03.2008)	Datum: 10.09.2008	CO2_M_~1 K:3 ppm
rot - Raumlufttemperatur	Startzeit:31.07.2007 18:00:00	
grün - relative Luftfeuchte Raumluft	Endezeit:20.06.2008 15:47:00	
blau - CO2 Gehalt der Raumluft	Kanäle:3 (3)	
	Meßpunkte:27823	

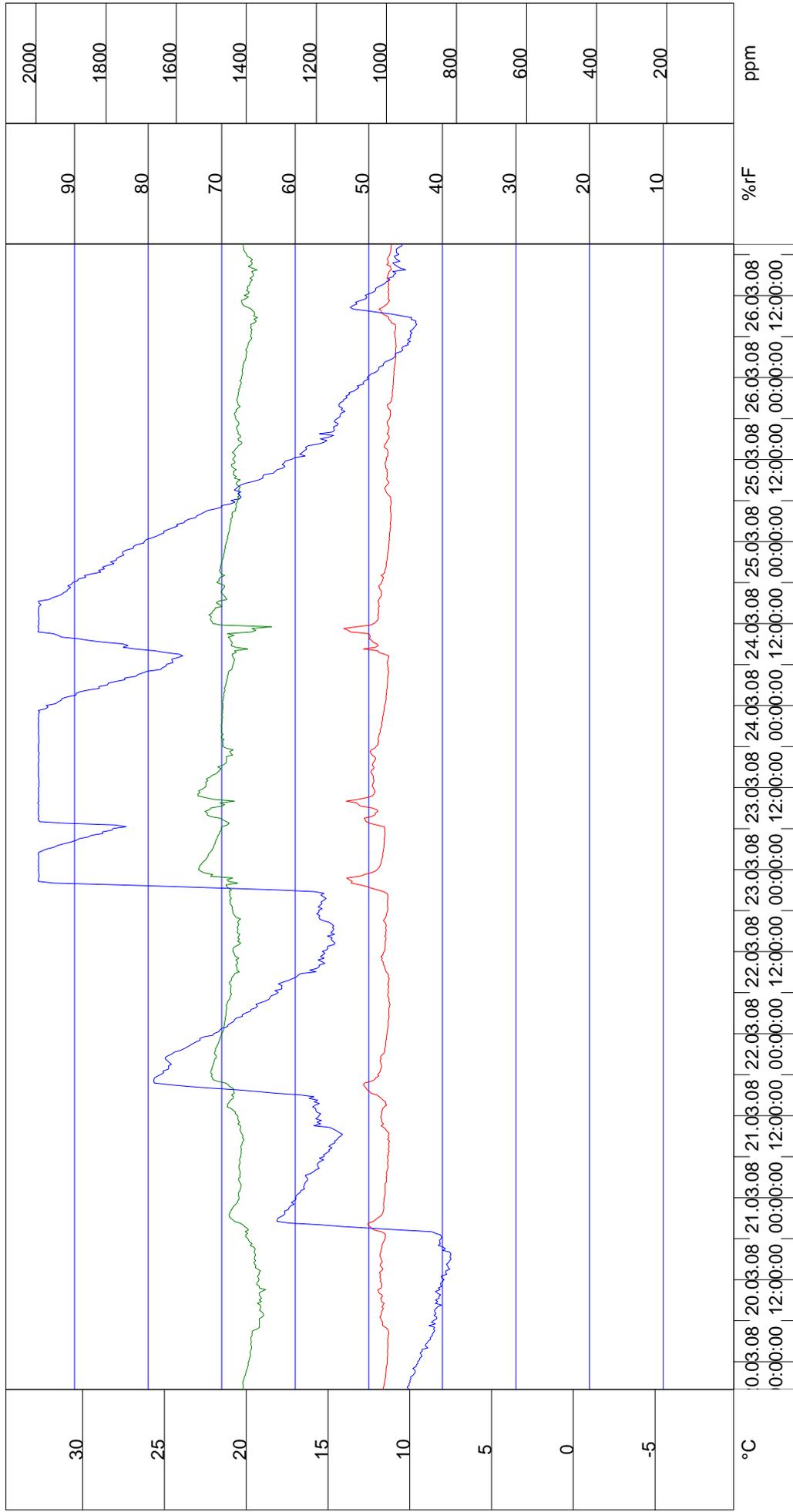
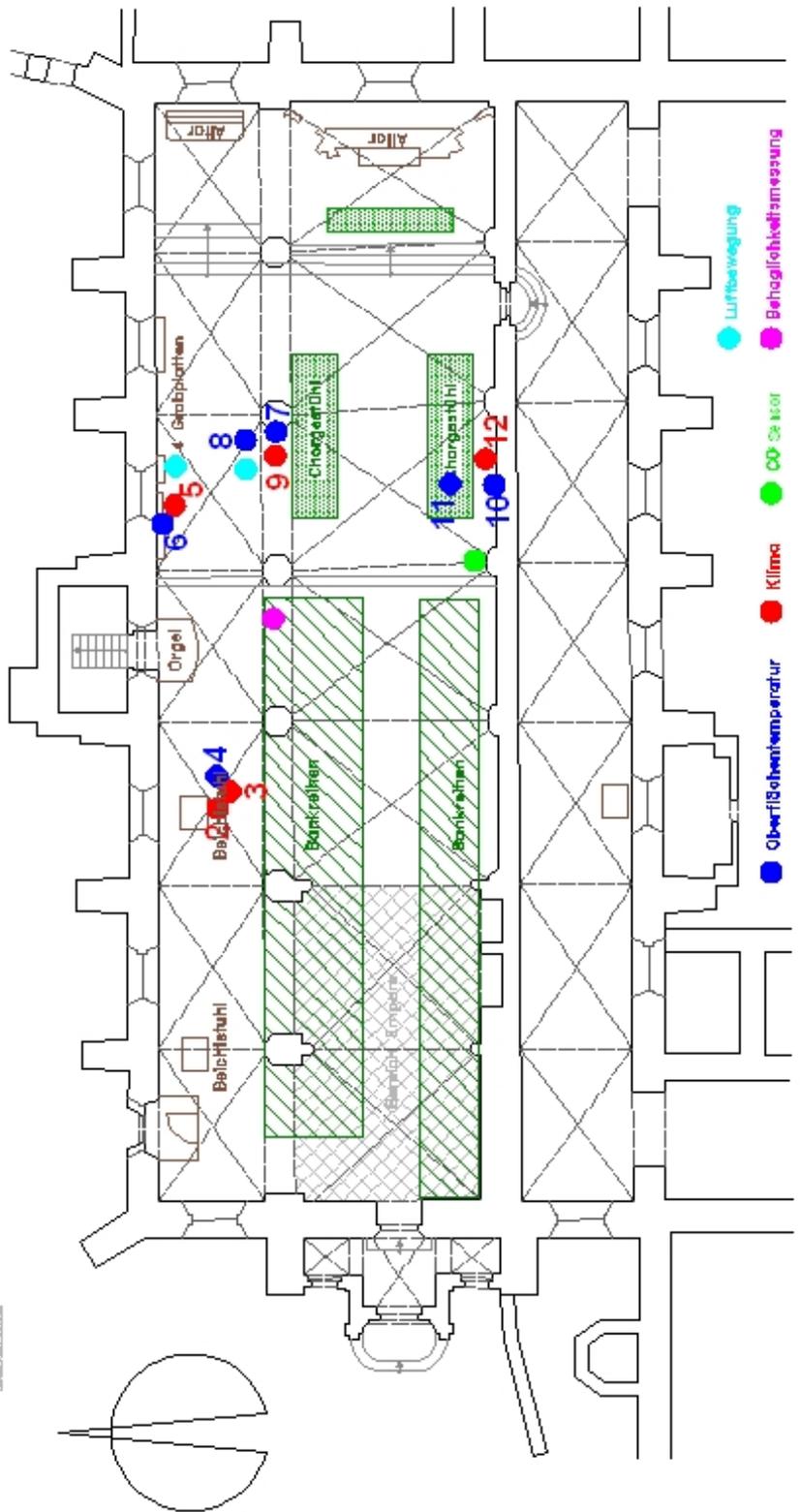
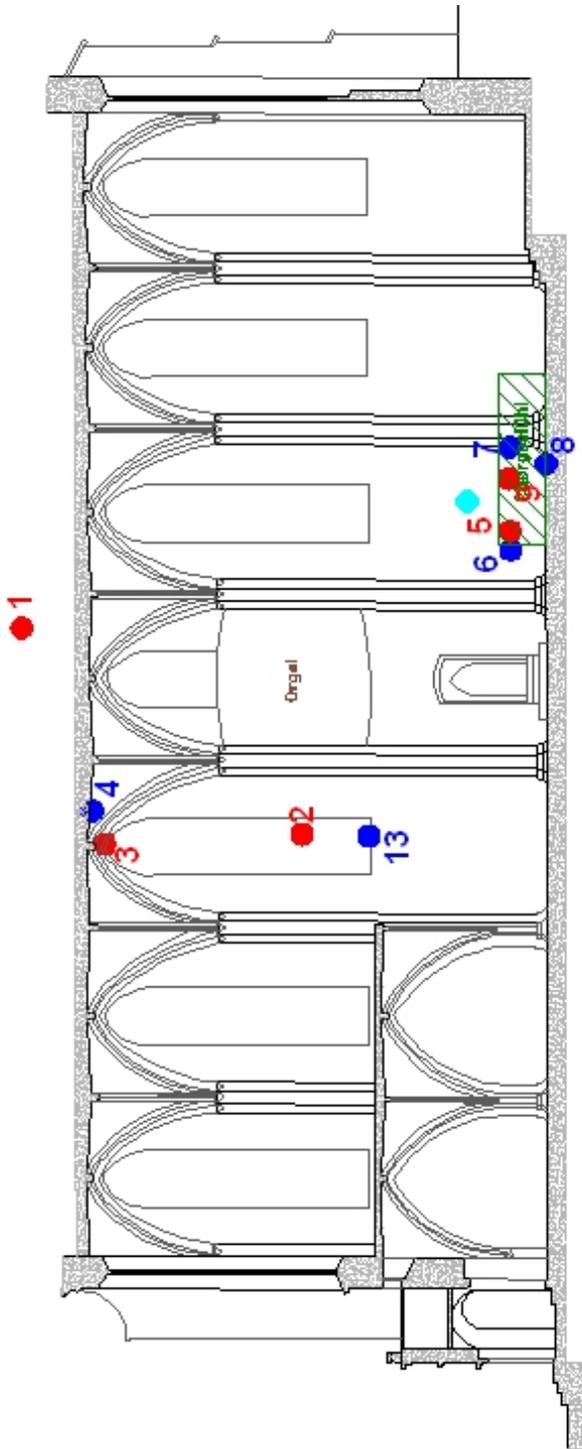
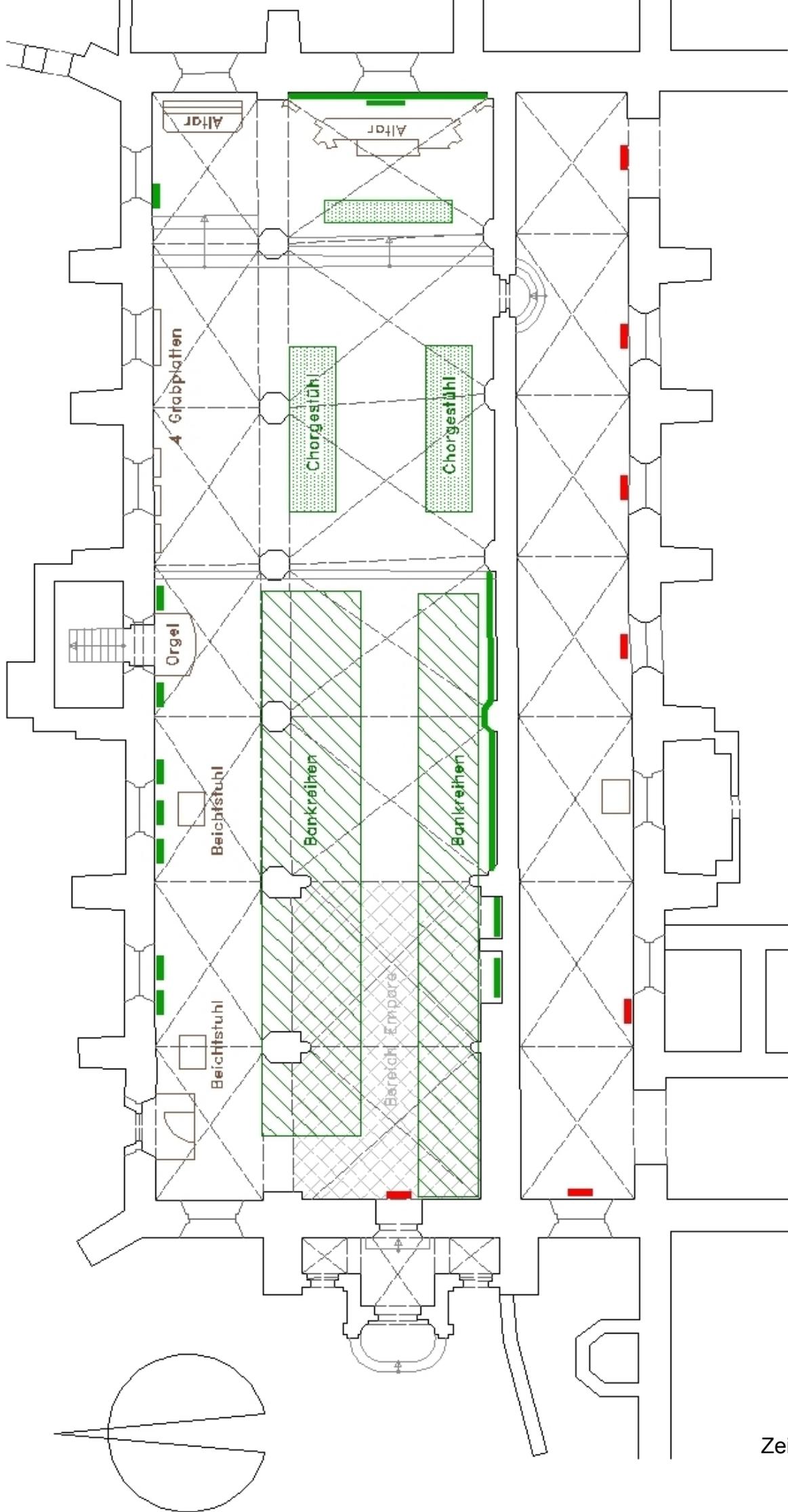


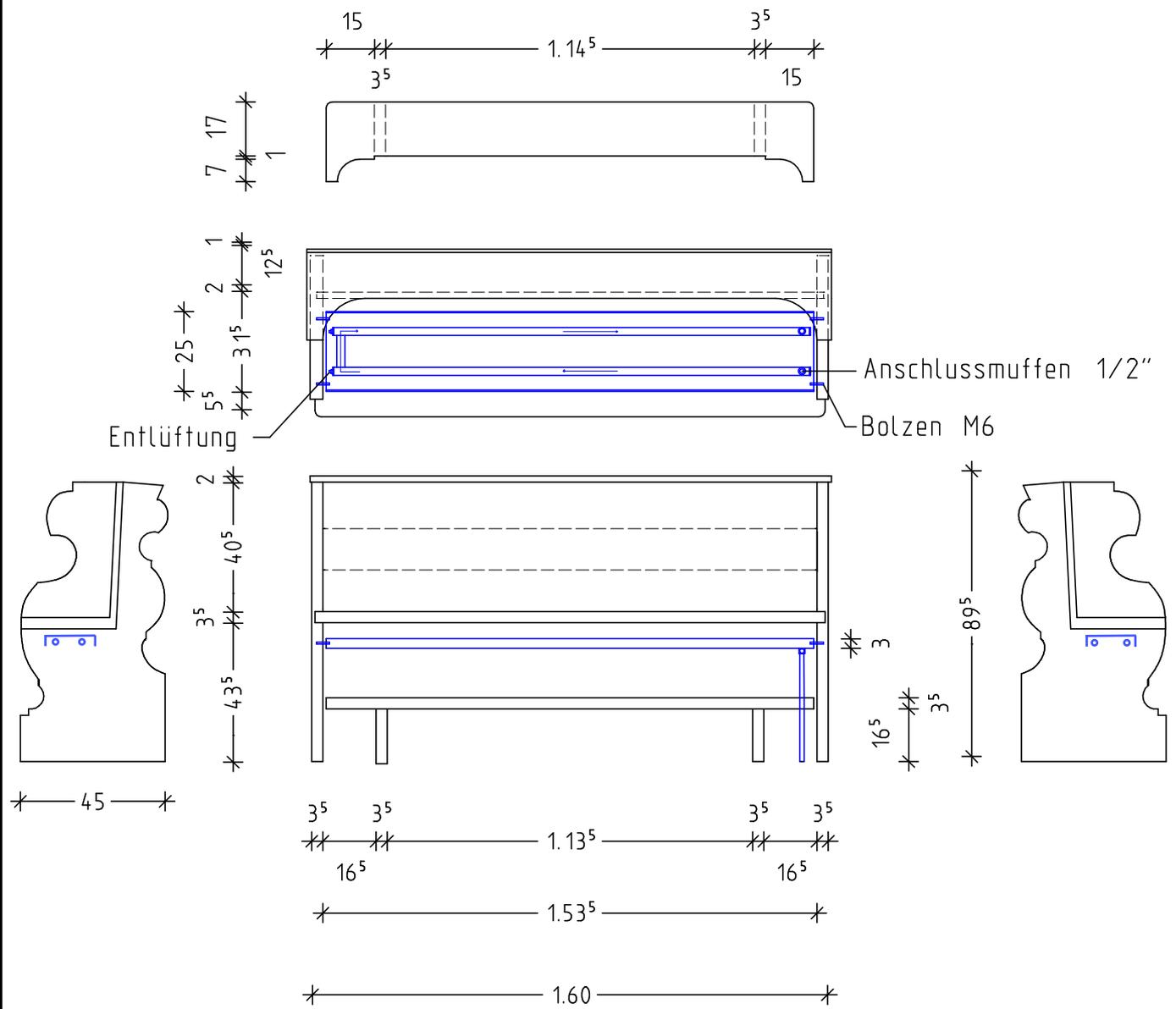
Diagramm 15



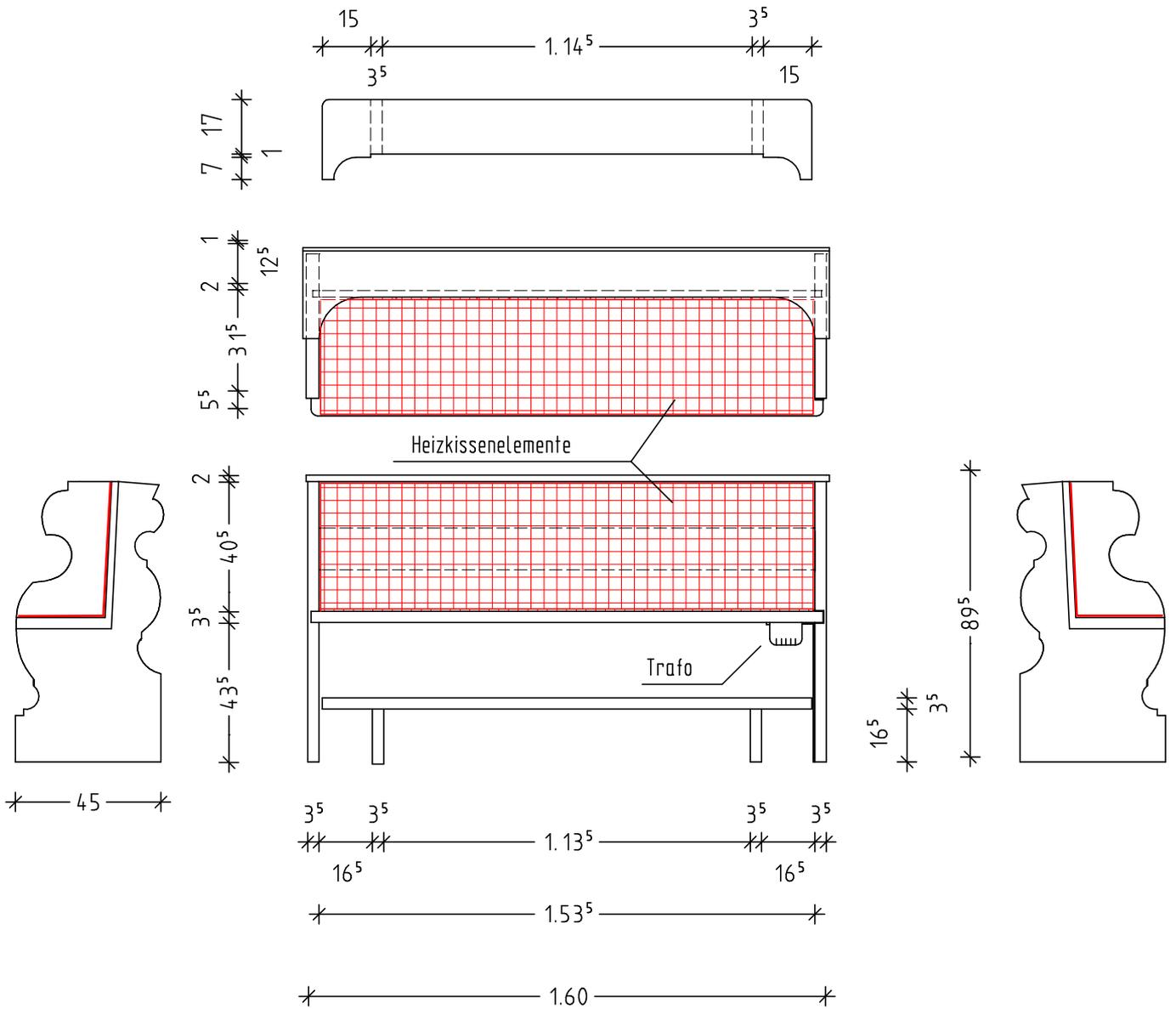
Zeichnung 1



Zeichnung 2



Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen Anhalt e. V. Schloßplatz 1 D - 01067 Dresden			
Musterbank, St. Marienstern, Bretschneider Bankheizkörper			M. 1:20
Bearbeiter: Weißflog, Johannes		Datum: 05.12.08	Blatt Nr. 2



Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen Anhalt e. V.
Schloßplatz 1 D - 01067 Dresden

Musterbank, St. Marienstern, Candor Sitzkissenheizung

M. 1:20

Bearbeiter: Weißflog, Johannes

Datum: 25.11.08

Blatt Nr. 1