



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

Bericht DD 03/2017

---

## Untersuchung modellhafter Maßnahmen zur gleichzeitigen Reduzierung des Energieverbrauchs, Verbesserung des Nutzerkomforts und Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes temporär genutzter Sakralbauten

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Projekt AZ 28066

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Berichterstattung:  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther, IDK e.V. Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Winkler, HTWK Leipzig  
Dipl.-Ing. Norbert Lange M.A., Torgau

Dresden, den 09.03.2017

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 Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

---

#### Arbeitsstellen in den Ländern:

##### Sachsen:

Schloßplatz 1  
01067 Dresden

Tel.: 0351 48435 109  
Fax.: 0351 48430 468

Internet: [www.idk-denkmal.de](http://www.idk-denkmal.de)

##### Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3  
06108 Halle

Tel.: 0345 472257 21/22/23  
Fax.: 0345 472257 29

e-mail: [info@idk-denkmal.de](mailto:info@idk-denkmal.de)

#### Vorstand:

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

#### Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

#### Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden  
IBAN.: DE52850503003120115524  
BIC: OSDDDE81XXX

Kto-Nr.: 3120 115 524 BLZ: 850 503 00  
St-Nr.: 203/140/15097

Ust-ID: DE234216408



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	28066	Referat	<b>24 / 0</b>	Fördersumme	<b>124.000 €</b>
----	-------	---------	---------------	-------------	------------------

**Antragstitel**      **Untersuchung modellhafter Maßnahmen zur gleichzeitigen Reduzierung des Energieverbrauchs, Verbesserung des Nutzerkomforts und Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes temporär genutzter Sakralbauten**

**Stichworte**      Kirchenheizung, Temperierung, Luftströmungen, Fallwinde, Kirchenfenster, Energieeinsparung, Gewölbedämmung, Zugluft, Verschmutzung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>76 Monate</b>	<b>01.09.2010</b>	<b>31.12.2016</b>	
Zwischenberichte:	11.02.2011	08.08.2011	31.02.2012
	05.08.2012	07.01.2013	09.08.2013

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Kloster St. Marienstern	Tel	035796-99412
	Zisterzienserinnen-Abtei Klosterstift St. Marienstern	Fax	035796-99455
	Cisinskistr. 35	Projektleitung	
	01920 Panschwitz-Kuckau	B.-Techn. Daniel Richter	
		Bearbeiter	
		Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther	
		Prof. Dr.-Ing. Steffen Winkler	

**Kooperationspartner**      Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
Karl-Liebknecht-Str. 132  
04277 Leipzig

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

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Die bauzeitlich als Kaltbau errichtete Kirche des Klosters wurde im Laufe ihrer Nutzung mit unterschiedlichen Einrichtungen zur Beheizung ausgestattet. Infolge dieser Entwicklung ergab sich eine Reihe von Problemen, wie sie für viele temporär genutzte Kirchen typisch sind: Auch lediglich temperierte Kirchen weisen deutlich steigende Energiekosten auf. Die aus einer ungeeigneten Beheizung resultierenden Verschmutzungen und die damit verbundenen Renovierungskosten führen ebenfalls zu einer Erhöhung der Bewirtschaftungskosten. Zudem sind in den Kirchen häufig erhebliche Defizite hinsichtlich der Behaglichkeit zu verzeichnen. Das Auftreten von Zugluft ist vielfach auch durch die Beheizung bedingt. Zielsetzung des Projektes sind Erarbeitung, Erprobung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Senkung der Betriebskosten temporär genutzter Kirchen bei gleichzeitiger Erhöhung des Nutzerkomforts.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Im Rahmen des Projektes wird ein Maßnahmenpaket entwickelt, messtechnisch einzeln und im Zusammenwirken untersucht und im Falle der nachgewiesenen Eignung in die Kirche denkmalgerecht integriert. Die wesentlichsten Bestandteile des Maßnahmenpaketes sind:

- Neugestaltung der raumklimatischen und heizungstechnischen Situation in der Kirche
- Neugestaltung des Chorgestühls mittels technischer Lösungen zur Abschottung von Zugluft
- Unkonventionelle Lösungen zur Reduzierung des Kaltluftabfalls an den Kirchenfenstern
- Nachträglichen oberseitigen Gewölbedämmung zur Verminderung der Gewölbeverschmutzung
- Betriebsoptimierung der Heizung (energiesparender Betrieb durch bedarfsgenaue Energiebereitstellung, Vermeidung der Ausbildung von Raumluftwalzen durch räumlich gleichmäßigen Eintrag der Heizenergie)

Sofern erforderlich werden neuartige Messmethoden erarbeitet und erprobt. So zum Beispiel der Einsatz von Farbmessstechnik zur Beurteilung der Entwicklung möglicher Verschmutzungen im Gewölbebereich.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Auf Grundlage der bekannten Zusammenhänge zur thermischen Behaglichkeit wurde festgestellt, dass durch die geringen Temperaturen in der Klosterkirche, dem Aktivitätsgrad der Nonnen und die vorhandene Luftgeschwindigkeit (Zugluft) keine thermische Behaglichkeit ohne eine zusätzliche Heizung bzw. einer Reduzierung der Zuglufterscheinungen erreicht werden kann. Nach Untersuchungen des ehemals benutzten Chorgestühls wurde dem Orden ein Neubau empfohlen. In diese Betrachtungen wurden die vorhandenen Raumluftrömungen in der Klosterkirche einbezogen. Die geringen inneren Oberflächentemperaturen der Kirchenfenster führen zu einer starken Abkühlung der Raumluf in diesem Bereich. Aufgrund des Dichteunterschieds fällt diese kalte Raumluf mit großer Geschwindigkeit nach unten und dringt nach Umlenkung im Fußbodenbereich in das Kircheninnere ein. Das erstellte „Strömungsmodell“ hat bei allen an den Untersuchungen Beteiligten wesentlich zum Verständnis der Zuglufterscheinungen im Kirchenraum beigetragen. Auf Grundlage einer Literaturrecherche über Entstehung und Berechnung von Fallluftströmungen wurden theoretische Grundlagen für Abhilfemaßnahmen geschaffen. Aktive und passive Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit wurden aufgezeigt und bewertet. Dabei stellt sich ein Windschott an den Maßwerkfenstern der Nordseite als beste Maßnahme für die Klosterkirche heraus. Diese Windschotte wurden mit unterschiedlichen Materialien bemustert, bemessen und für die Fenster der Nordseite installiert.

Weiterhin hat sich dieses Projekt mit einer Konzeptbetrachtung für den Neubau eines Chorgestühls befasst. Nach einer Analyse der Randbedingungen und dem Erarbeiten einer Anforderungsliste wurde die Ausgangssituation übersichtlich dargestellt. Bei dem Aufstellen und Zusammenstellen der Konzepte waren die Beteiligten bemüht, alle aktiven und passiven Maßnahmen getrennt voneinander darzustellen und zu bewerten. Durch das Erstellen eines 3-Zonen-Modells und das Bewerten der Heizsysteme, abgestimmt auf das Kloster und die Anforderungen der Nonnen, konnte eine „bisher in der Literatur nicht nachgewiesene Herangehensweise“ bei der Auswahl der richtigen Systeme herausgearbeitet werden. Der empfohlene Aufbau ist in einer Matrix sowie in einem Flächenmodell dargestellt. Bei allen Untersuchungen und Aussagen war es wichtig, dass sowohl ein Statiker (Tischler) als auch ein Gestalter (Innenarchitekt oder Holzkünstler) auf dem theoretischen Modell zur Herstellung der thermischen Behaglichkeit praktisch aufbauen kann. Es wurde versucht, an die Fertigung zu denken und das Gestühl für eine Modulbauweise auszulegen. Jedes Bauteil des Chorgestühls wurde einzeln auch unter dem Aspekt der Zweckmäßigkeit betrachtet. Theoretische Untersuchungen der Strömungsverläufe am Chorgestühl sowie Berechnungen einzelner Bauteile bilden die Grundlage für Empfehlungen an den Orden im Hinblick auf die Gestaltung des Chorgestühls. Schwachstellen in der derzeitigen Heizungstechnik wurden aufgezeigt und Änderungshinweise gegeben. Durch die Berechnung der thermischen Behaglichkeit anhand eines wärmephysiologischen Prüfmodells konnte ein sehr guter Bezug für das abschließende Modell gefunden werden. Kritisch wird eingeschätzt, dass aufgrund der Stärke der umgebenden Einflüsse eine thermische Behaglichkeit nicht in jedem Bereich des Chorgestühls zu erwarten ist. Dessen ungeachtet wird eine Steigerung der Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich erwartet. Mit den erbrachten Messungen, geleisteten Untersuchungen und getätigten Berechnungen wurde ein fundierter Lösungsvorschlag erarbeitet und eine begründete sowie weitgehend abgestimmte Grundlage für den Neubau eines Chorgestühls geschaffen.

Die Untersuchungen am Kirchengewölbe zur Farbveränderung haben aufgezeigt, dass eine Gewölbedämmung zur Reduzierung einer erneuten Verschmutzung beitragen kann. Jedoch sind die zeitlichen Abfolgen nicht eindeutig abschätzbar. So kann der Kosten – Nutzen – Aspekt nicht eindeutig geklärt werden. Hier gibt es weiteren Untersuchungsbedarf, da der erbrachte Forschungsansatz vielversprechend scheint.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Mehrere Fachveröffentlichungen wurden vorbereitet und sind bereits während der Projektphase veröffentlicht worden (Jahrbuch 2013 des Landesamtes für Denkmalpflege, Vorträge zur Energieeinsparung in Kirchenbauten z.B.: Verband der Kirchbauvereine Sachsen-Anhalt e.V., Eisleben, 11.10.2014, Tagung der Kirchbaureferenten, Neudietendorf, 18.11.2015, Fachtagung „Kirchliches Umweltmanagement“, Wittenberg, 14.03.2015)

## **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 Untersuchungsprogramm kann die Bestandssituation problemorientiert abbilden. Gezielte Eingriffe zur Reduzierung der Zuglufterscheinungen und der Verbesserung der Lokaltemperierung im Chorgestühl und dem Laiengestühl sorgen für Verbesserungen im Behaglichkeitsempfinden der Kirchenbesucher. Trotzdem sind noch nicht alle Zuglufterscheinungen behoben. Hier sind weitere denkmalgerechte Lösungsansätze zu suchen. Eine Reduzierung der Neuverschmutzung der Gewölbeflächen scheint durch eine Dämmung und der Reduzierung der Luftbewegungen im Kirchenraum möglich.

## Inhalt

1	Projektpartner .....	5
2	Zusammenfassung .....	6
3	Einleitung.....	7
3.1	Zisterzienserinnen-Abtei St. Marienstern – Geschichte und Gegenwart.....	7
3.2	Klosterkirche – Bedeutung und Rang des Bauwerks .....	8
3.3	Projektvorhaben .....	9
3.4	Umweltrelevanz .....	9
3.5	Zielsetzung des Vorhabens .....	10
3.6	Innovativer Charakter des Projektes .....	10
4	Kurzvorstellung der Ergebnisse des Vorprojektes (2007 - 2008).....	11
5	Das neue Heizungskonzept .....	12
5.1	Einführung .....	12
5.2	Empfehlungen aus dem „Vorprojekt 2007 - 2008“.....	13
6	Ergebnisse einer raumklimatischen Langzeituntersuchung.....	17
6.1	Einführung .....	17
6.2	Ergebnisse der Voruntersuchung 2007 - 2008.....	18
6.3	Ergebnisse der Nachuntersuchung 2010 – 2011 und 2014 - 2016.....	20
7	Energieverbrauch Klosterkirche .....	25
7.1	Empfehlungen aus dem Vorprojekt 2007 - 2008.....	25
7.2	Erfahrungen aus dem aktuellen Projekt .....	26
8	Reduzierung von Raumlufströmungen und Minimierung von Fallluftströmungen an Kirchenfenstern .....	26
8.1	Einführung .....	26
8.2	Messtechnische Erfassung der Luftströmungen .....	27
8.3	Strömungsmodell Klosterkirche .....	28
8.4	Entstehung von Fallluftströmungen.....	30
8.5	Besonderheiten am Kirchenfenster St. Marienstern.....	31
8.6	Berechnung der Fallluftströmung .....	34
8.7	Aktive Gegenmaßnahmen - Fenster .....	35
8.8	Passive Gegenmaßnahmen - Fenster .....	40
8.9	Windschottsysteme für die Klosterkirche St. Marienstern.....	46
8.10	Verknüpfung der Maßnahmen .....	52
8.11	Zusammenfassung Raumlufströmung .....	53
9	Das neue Chorgestühl.....	54

9.1	Grundlagen.....	54
9.2	Physikalische Bedingungen .....	55
9.3	Physiologische Bedingungen .....	61
9.4	Konzeptbetrachtung neues Chorgestühl .....	63
9.5	Darstellung Oberflächentemperaturen und Wirkprinzip des neuen Chorgestühls durch IR-Thermographie.....	93
9.6	Bildliche Abfolge der Planung des Chorgestühls.....	96
10	Visueller Vergleich von Luftströmungen im Kirchenraum zur Voruntersuchung .....	99
10.1	Einführung .....	99
10.2	Luftströmungen Voruntersuchung 2007 - 2008 .....	101
10.3	Luftströmungen Nachuntersuchung 2010 - 2012 .....	102
11	Auswirkung einer Gewölbedämmung auf die erneute Verschmutzung der Oberfläche	103
11.1	Darstellung Oberflächentemperaturen durch IR-Thermographie.....	104
11.2	Messgerät zur Farbmessung, Messmethode .....	105
11.3	Beobachtungen / Messdaten .....	107
11.4	Interpretation der Messdaten .....	117
11.5	Schlussfolgerungen, Aussichten .....	118
12	Fazit und Projekterkenntnisse.....	119
13	Quellenverzeichnis .....	121

## 1 Projektpartner

### **Zisterzienserinnen-Abtei Klosterstift Marienstern**

Čišinskistr. 35

01920 Panschwitz-Kuckau

- Dipl.-Ing. (FH) Johannes Lukasch (†)
- Schwester Paulina
- B.-Techn. Daniel Richter

### **Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK)**

Schloßplatz 1

01067 Dresden

- Dipl.-Ing. (FH) Thomas Löther

### **HTWK Leipzig**

Karl-Liebknecht-Str. 132

04277 Leipzig

Fakultät Maschinenbau und Energietechnik

- Prof. Dr.-Ing. Steffen Winkler
- Dipl.-Ing. Norbert Lange M.A.
- Dr. Ing. Olaf Freytag
- Dipl.-Ing. (FH) Stefan Frei (Masterstudent)

## 2 Zusammenfassung

In der Klosterkirche St. Marienstern in Panschwitz-Kuckau in Sachsen wurden in den Jahren 2007 - 2008 in einem von der DBU geförderten Projekt Voruntersuchungen durchgeführt, die den Umbau der Heizungsanlage in ein energieeffizientes Beheizungssystem fundierten. Das Projekt trug den Titel: „Nutzungsorientierte optimierte Lokalterpierung in Kirchen – modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung“ (AZ 24824).

Die bestehende klimatische und bauliche Situation des historischen Kirchenbaus wurde durch zahlreiche Messungen erfasst. Die Durchführung von Rauchversuchungen ermöglichte es, die schwierige Strömungssituation der Luftbewegungen zu erfassen. Die Messungen der Temperatur und Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum zeigten die klimatischen Bedingungen vor Ort.

Das damalige Heizsystem der Klosterkirche verschmutzte die Wände mit Schwarzstaub erheblich. Die Vermutung lag nahe, dass die starken Luftströmungen im Raum einen großen Anteil an der starken Verschmutzung der Wände hatten. Als ersten Schritt setzte man auf Grund dessen Simulationsrechnungen zur Bestimmung des Heizungssystems und der Regelstrategie ein. Die berechneten Werte wurden mit den Verbrauchsmessungen und den Innenklimamessungen verglichen. In einem zweiten Schritt erfolgte eine Unterteilung des Kircheninnenraumes in mehrere Zonen, um die unterschiedlichen Nutzungsbereiche wie Chorgestühl, Kirchenbankreihen oder den Bereich über dem Kreuzgang genauer abbilden zu können. Die angewandten Messungen, Simulationen und Berechnungen führten dazu, dass Aussagen über die thermische Behaglichkeit in den Zonen Chorgestühl und normale Kirchenbankreihen sowie zu den Heizleistungen der einzelnen Heizsysteme und deren Regelungskonzept getroffen werden konnten. Als Ergebnis dieses Projektes wurde ein neues, dem Raum und der Nutzung angepasstes, Heizsystem entwickelt. In den darauf folgenden Jahren erfolgten erste bauliche Umsetzungen des neuen Konzeptes. Das bestehende Heizsystem wurde fast vollständig ausgebaut, eine zonierte Bankheizung installiert, das Chorgestühl in einer energetisch optimalen Variante neu gebaut und vertikal verlaufende Windschottsysteme an den besonders negativ wirkenden Nordfenstern der Kirche angebracht. Auf einem kleinen Teilstück des Gewölbes erfolgte die Aufbringung einer Gewölbedämmung mit dem Hauptziel eine Verzögerung der Oberflächenverschmutzung zu erreichen.

In diesem Abschlussbericht werden all diese Maßnahmen einzeln vorgestellt, mit den Untersuchungen und Empfehlungen des „Vorprojektes“ verglichen und die daraus resultierenden Ergebnisse zur Diskussion gestellt.

Das Projekt zeigt modellhaft, wie ausschließlich durch eine lange Vorbereitung mit der Beteiligung unabhängiger Fachleute ein 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 vielen Denkmälern in Deutschland.



### 3 Einleitung

#### 3.1 Zisterzienserinnen-Abtei St. Marienstern – Geschichte und Gegenwart

Das Kloster St. Marienstern ist zusammen mit dem ebenfalls in der Oberlausitz gelegenen Kloster St. Marienthal das älteste ununterbrochen bestehende Zisterzienserinnenkloster 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  
Quelle: IDK e.V.

Das DBU-Projekt musste auf Grund einer unerwarteten Baumaßnahme ausgesetzt werden. Die historischen Granitplatten des Fußbodens zeigten an mehreren Stellen im Kirchenschiff Setzungserscheinungen, die nach ersten Untersuchungen auf eine Unterspülung des gesamten Fußbodens hindeuteten. Daraufhin musste die Klosterkirche geschlossen werden und es begannen erhebliche Baumaßnahmen im Fußbodenbereich, die wiederum durch archäologische Untersuchungen begleitet wurden (Abb. 2). Aus diesem Grund konnten viele Untersuchungen und bauliche Maßnahmen aus dem hier vorgestellten Projekt nicht wie geplant umgesetzt werden, sondern erfolgten erst nach über einem Jahr.



Abb. 2 Kirchenfußboden während der Zeit der archäologischen Grabungen  
Quelle: Kloster St. Marienstern

Ein weiterer Grund für eine Verlängerung der Projektlaufzeit lag in einer strukturellen Änderung der Projektleitung.

### 3.2 Klosterkirche – Bedeutung und Rang des Bauwerks

Die Klosterkirche von St. Marienstern ist eine dreischiffige Hallenkirche, deren Südschiff in einmaliger Weise geteilt ist. Der untere Bereich dient als Kreuzgang und der obere als Zugang der Schwestern zum westlichen Nonnenchor. Die Klosterkirche gehört zu den wichtigsten Sakralbauten des Mittelalters im mitteldeutschen Raum. Erbaut zwischen 1250 und 1300 stellt die Kirche zusammen mit dem Dom zu Meißen das bedeutendsten 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 sucht. 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. Seitdem ist St. Marienstern in der internationalen Forschung ein fester Begriff.

### 3.3 Projektvorhaben

Die Klosterkirche St. Marienstern steht vor einer großen 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 das Heizungssystem einer Temperaturregulierung angepasst werden, die in Bezug auf Verbrauch und Ausbeute optimal auf den Nutzen und die Nutzung angepasst ist. Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen ist dieses optimal zu konzeptionieren.

Die Kirche des Klosters St. Marienstern wurde im Laufe ihrer Nutzung, wie das Kloster insgesamt, mit technischen Einrichtungen zur Beheizung ausgestattet. Der erste nachweisliche Einbau einer Heizungsanlage erfolgte um das Jahr 1862. Infolge dieser Entwicklung ergab sich jedoch eine Reihe von Problemen:

- Kosten für Betrieb und Unterhalt der Kirche: Der Unterhalt der Kirche des Klosters ist mit erheblichen laufenden bzw. periodisch wiederkehrenden finanziellen Aufwendungen verbunden. Obwohl die Kirche in den Wintermonaten auf lediglich 10°C - 12°C temperiert wird, betragen die jährlichen Heizkosten ca. 9000,- € (Stand 2012 mit steigende Tendenz). Die Rauminnenschale bedarf in relativ kurzen Intervallen (weniger als 20 Jahre) einer Renovierung. Entsprechend dem derzeitigen Preisniveau (2012) sind hiermit Kosten von 220.000,- € verbunden. Für die Abdeckung der Heizkosten und die Bildung einer Instandhaltungsrücklage sind somit jährlich mindestens 20.000,- € aufzubringen. Da bereits jetzt seitens der Nonnen und der Besucher der Klosterkirche vielfach über Zugerscheinungen geklagt wird, scheidet eine weitere Absenkung der Raumlufttemperatur in der Kirche zwecks Begrenzung der Energiekosten aus.
- Verschmutzungserscheinungen: In IDK e.V. (2009) konnte nachgewiesen werden, dass ein enger Zusammenhang zwischen der Art der Beheizung der Kirche und der Verschmutzung der Rauminnenschale besteht. Vor allem die an der Wandoberfläche anliegenden Warmluftschleier in unmittelbarer Nähe von Heizkörpern verursachten starke Verschmutzungen an raumseitigen Wandoberflächen. Ein weiterer Grund, besonders für ungleichmäßige Verschmutzungen an der Gewölbeunterseite, sind zu geringe raumseitige Oberflächentemperaturen. Diese sind besonders dann problematisch, wenn ein ständiger Wechsel von höheren (Ziegel) und niedrigeren (Mörtelfuge) Oberflächentemperaturen erfolgt.
- Diskomforterscheinungen: Vor allem der an den Fenstern der Nordwand entstehende Kaltluftabfall verursacht besonders im Bereich des Chorgestühls erhebliche Zugerscheinungen. Seitens der Nonnen werden daher entsprechende Gegenmaßnahmen gewünscht.

### 3.4 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 bestehenden 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. Aus den genannten Gründen wird im Projekt das historische Konzept aufgegriffen, die Veränderungen so gering wie möglich gehalten und moderne, energieintensiv hergestellte Wärmeschutzstoffe nur ganz gezielt eingesetzt. Das umweltrelevante Ziel des Projektes ist es, die Wärmeenergie in ganz geringen Anteilen und ganz gezielt in Bezug auf Zeit und Raum in das großvolumige Objekt einzutragen, bei gleichzeitiger Gewährleistung des Erhaltens der historisch wertvollen Ausstattung. Es kommt zu einer Umweltentlastung durch die geringe Energieverwendung im Vergleich zum aktuellen Zustand. Die einschlägigen Regelungen und Verordnungen nehmen nur unzureichend Rücksicht auf den historischen Baubestand. Die Eigenschaften der verbauten historischen Materialien werden zum Beispiel nicht berücksichtigt. Die Folge ist, einer auf DIN-basierten Angaben ermittelte Heizungsplanung, die zu brisanten Rechenergebnissen führt. Dies ist nicht verwunderlich, wenn unzulässige Annahmen die Voraussetzung für die Rechnung sind. Die bestenfalls abgeschätzten Angaben sind auf die historische Substanz nicht anwendbar.

### **3.5 Zielsetzung des Vorhabens**

Grundlegende Zielstellung des vorliegenden Projektes ist die Erarbeitung und Realisierung eines integrierten Konzeptes zur Senkung der Betriebskosten der Kirche, welches eingebettet ist, in das langfristige Energieversorgungskonzept des Klosters St. Marienstern.

Teilziele. Ausgehend von dieser grundlegenden Zielstellung ergeben sich für das vorliegende Vorhaben insgesamt folgende Teilziele:

1. Deutliche Verlängerung der Renovierungsintervalle der Kirche,
2. Senkung der Diskomforterscheinungen in der Kirche,
3. Vermeidung eines Anstieges der Kosten für die Beheizung der Kirche,
4. Kompatibilität des umgestalteten Heizsystems der Kirche mit zukünftigen Veränderungen in der Energieversorgung der gesamten Klosteranlage,
5. Keine Erhöhung der thermisch-hygrischer Belastung der Ausstattung und des Baukörpers infolge der Umgestaltung des Heizsystems und der Absenkung der Raumlufttemperatur

### **3.6 Innovativer Charakter des Projektes**

Konzeptionell. Die Energieversorgung des Klosters St. Marienstern wird als ein offenes System aufgefasst, welches langfristig einer ständigen planmäßigen Weiterentwicklung bedarf. Alle energierelevanten Maßnahmen an einzelnen Gebäuden des Klosters werden hinsichtlich ihrer langfristigen Auswirkungen auf die Energieversorgung des Klosters überprüft und in das langfristige Energieversorgungskonzept, in dessen Rahmen eine autarke Energieversorgung angestrebt wird, eingebettet.

Technisch. Die Neugestaltung des Einsatzes und der Anordnung der Heizflächen ist dadurch geprägt, dass ein multiples Heizsystem realisiert wird. Dessen Merkmale sind:

- Kombination unterschiedlicher Arten von technischen Einrichtungen zur Wärmeabgabe,

- Verwendung jeweils spezieller Wärmeabgabeeinrichtungen für die Sicherung der thermischen Behaglichkeit, der Unterbindung von Zuglufterscheinungen und der Vermeidung von thermisch-hygrischen Schäden an der Baukonstruktion,
- energetische Zonierung der Kirche,
- Einsatz von unterschiedlichen Energieträgern (Kalt- und Warmwasser) für die Wärmebereitstellung und
- Verknüpfung der unterschiedlichen Arten von technischen Einrichtungen zur Wärmeabgabe über eine Wärmeleistungsregelung auf der Basis einer instationären Leistungskennlinie in Verbindung mit einer Betriebsoptimierung des Heizsystems auf der Grundlage der Kriterien Energieeinsparung, thermische Behaglichkeit (u. a. Raumluftströmung) und Bautenschutz (Vermeidung thermisch-hygrischer Probleme).

Der Einsatz von mechanischen Einrichtungen zur Abschottung von Zugluft in unmittelbarer Nähe der hiervon betroffenen Personen stellt, vor allem für Sakralbauten, eine unkonventionelle Lösung zur Verbesserung der Behaglichkeit ohne zusätzlichen Energieeinsatz dar. Temporäre raumseitige Fensterverkleidungen zur Vermeidung des Kaltluftabfalls sind bisher nicht unbedingt gebräuchlich. Sie stellen sowohl technisch als auch denkmalpflegerisch ein Novum dar.

#### **4 Kurzvorstellung der Ergebnisse des Vorprojektes (2007 - 2008)**

Die Beheizung der Kirche ist in die Energieversorgung der Klosteranlage eingebunden. In einer durch das Vorprojekt 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 der Klosterkirche kann ausschließlich unter Berücksichtigung der ganzen Klosteranlage und seiner Energieverwaltung erfolgen. Daher kommt dem Energiemanagement in Zukunft eine wichtige Bedeutung zu. Zum Umbau der Beheizungsanlage in der Klosterkirche im Einzelnen ist zunächst voraus zu schicken, dass Köhler den Einsatz der modernen Hackschnitzelfeuerung positiv bewertet. Daher sollte in Zukunft auch ein großer Teil der Beheizung der Klosterkirche darüber versorgt werden. 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, 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 dem Kirchenraum zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Grundtemperatur etwas abgesenkt und auf etwa 8°C gehalten wird. Normale Heizkörper können durch eine höhere Vorlauftemperatur eine größere Energiemenge in den Raum abgeben. Die Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore sollten technisch überprüft werden und, wenn möglich, größere Heizkörper in Erwägung gezogen werden. Es sollten aber nur die Heizkörper bestehen bleiben, die direkt unter einem Fenster positioniert sind. Die anderen Heizkörper in der Klosterkirche können zurückgebaut werden. Die Heizmenge von diesen Stellen, trug in den vergangenen Jahren hauptsächlich zur intensiven Verschmutzung bei und 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 Pla-

nungsleistungen 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 Heizkörper auf der Chorgasse und der Fußbodenheizung im Chorgestühl nicht ausreichen wird die geplanten  $+8^{\circ}\text{C}$  Grundtemperatur auch im Winter stabil zu halten, sollten weitere Wärmeabgabestellen in der Klosterkirche verteilt werden. Ein besonderes Augenmerk lag bei den raumklimatischen Untersuchungen bei der Behaglichkeitsmessung auf den Besucherreihen. In diesem bisher nicht beheizten Bereich sollte eine modifizierte warmwassergeführte Bankheizung unter den Sitzbereichen eingebaut werden. Die Bankreihen stehen auf einem ca. 8 cm hohen Holzpodest, so dass die neue Rohrführung keine umfangreichen Arbeiten an dem Granitfußboden erforderlich machen. 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 Verhinderung von Tauwasserausfall zu prüfen. Durch die Verhinderung von Tauwasserausfall auf der Oberfläche des Gewölbes, kann die erneute Verschmutzung stark abgemindert werden. 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 Lokaltemperierung 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 dazu geschaltet werden. Der Organist sollte durch eine elektrisch betriebene Beheizung an seinem Platz versorgt werden.

## 5 Das neue Heizungskonzept

### 5.1 Einführung

Die Angaben zu einer möglichen Beheizung der Klosterkirche im Mittelalter sind spärlich. Wenzler (2008) beschreibt, dass „... Neufassung erfolgte 1860-1861. (...) Starke Feuchtigkeits-

schäden und die Auswirkung der neuen Heizung machten bereits dreißig Jahre später eine komplette 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.“ (Winzler 2008) Demnach war der Innenraum nach 40 Jahren wieder stark verrußt. 1933 wurde an den Chor im Osten ein Heizhaus angebaut. 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. 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.

## 5.2 Empfehlungen aus dem „Vorprojekt 2007 - 2008“

Erste technische Rahmenbedingungen für eine Konzeption und Dimensionierung der neuen Raumheizung wurden durch das „Vorprojekt“ 2007 - 2008 festgelegt bzw. empfohlen. Die Zuführung eines Teiles der Wärme sollte nah am Nutzer zur Reduzierung der mittleren Raumlufttemperatur erfolgen. Vor allem sollte die Wärme nicht punktuell oder zentral sondern weit verteilt eingebracht werden. Dies soll einem ungünstigen Raumluftrömungsverhalten entgegenwirken, der für sehr unangenehme Zuglufterscheinungen im Kirchenschiff sorgte und zu starken Verschmutzung der Raumschale beitrug. Im Grundriss (Abb. 3) ist das ehemalige Heizungssystem dargestellt, welches 2007 - 2008 bemessen und untersucht wurde. In Tabelle 1 erfolgt eine bildliche Darstellung der ehemaligen einzelnen Heizungsbestandteile.

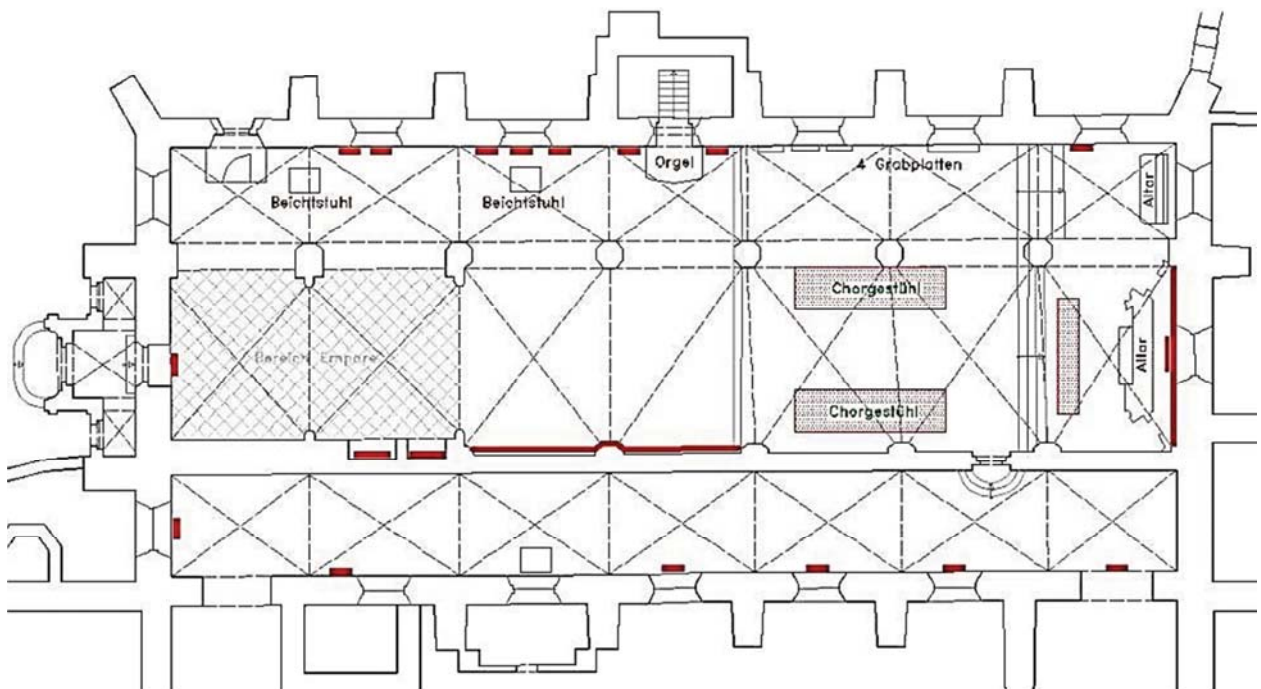


Abb. 3 Grundriss Klosterkirche mit ehemaligen Heizungssystem bis 2008  
rot – einzelne Heizungselemente im Kirchenraum  
Quelle: IDK e.V.

Tabelle 1 bildliche Darstellung einzelner Heizungsbestandteile in der Klosterkirche bis 2008  
Quelle: IDK e.V.



Heizkörper auf der Chorgasse



Heizkörper in Wandnischen

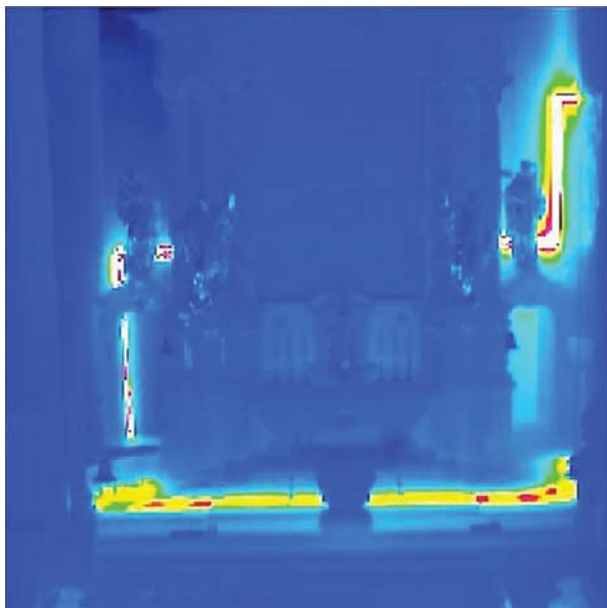


Heizkörper an Wandfläche

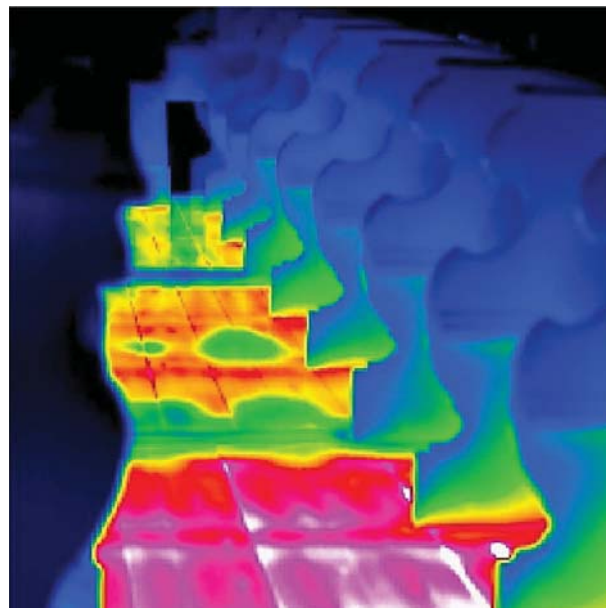


Rohrheizkörper an Wandfläche





Rohrsystem hinter Hochaltar



Bankheizung Chorgestühl



Chorgestühl



Fußbodenheizung unter Chorgestühl

Empfohlen wurde nach den Untersuchungen 2007 - 2008 der Umbau der Kirchenheizung in folgenden Punkten:

- Bis auf die Heizkörper im Bereich der Chorgasse / Nonnenempore sollten alle Heizkörper und Heizrohre aus dem Kirchenschiff ausgebaut werden,
- Modernisierung der Heizung im Bereich des Chorgestühls,
- Installierung einer modernen Bankheizung, die in einzelnen Gruppen von Bankreihen zuschaltbar ist,

- Reduzierung der Fallluftströmung im Bereich der Nordfenster.

Im Grundriss in Abb. 4 sind diese Empfehlungen schematisch dargestellt.

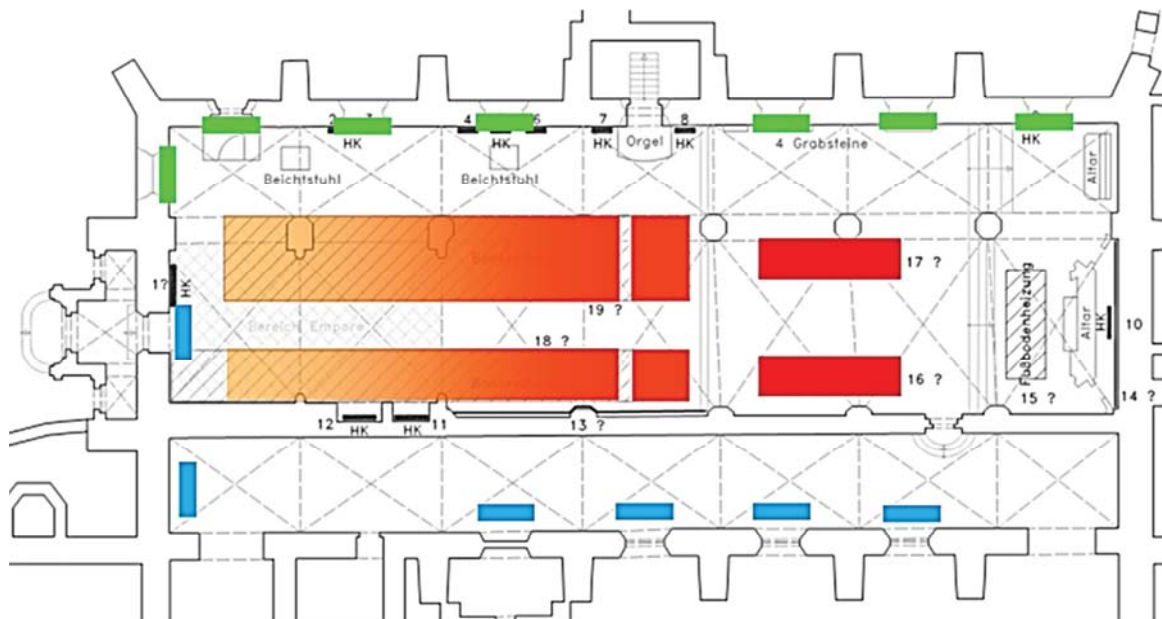


Abb. 4 Grundriss Klosterkirche mit empfohlenen zukünftigen Heizungssystem  
rot – Bankheizung im Bereich des Chorgestühls und der einzelnen Bankreihen  
grün – Reduzierung der Fallluftströmung im Bereich der Nordfenster  
blau – verbleibende Heizkörper auf der Chorgasse und der Nonnenempore  
Quelle: IDK e.V.

In einem ersten Schritt konnten durch größere Baumaßnahme im Kirchenschiff im Jahr 2009 die bestehenden Heizkörper und Heizrohre ausgebaut werden. Dafür erfolgte die Installation einer modernen warmwassergeführten Bankheizung, die in Gruppen zu je fünf Bankreihen geschaltet werden können (Abb. 5). Am Chorgestühl konnte eine erste wirksame Verbesserung kurzfristig angebaut werden – Klapptüren an den seitlichen Zugängen (Abb. 6).



Abb. 5 warmwassergeführte Bankheizkörper unter den einzelnen Bankreihen  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 6 Klapptüren an den seitlichen Zugänge zur Reduzierung von Luftströmungen im Fußbereich des Chorgestühls  
Quelle: IDK e.V.

## 6 Ergebnisse einer raumklimatischen Langzeituntersuchung

### 6.1 Einführung

Die raumklimatische Untersuchung der Klosterkirche St. Marienstern hatte zur Aufgabe, die bestehende klimatische Situation im Kirchenschiff über einen längeren Zeitraum zu erfassen und zu bewerten. Gleichzeitig sollte der Einfluss der Beheizung, der Nutzer und des Außenklimas auf den Kirchenraum beurteilt werden. Dazu erfolgte die Installation eines Klimamesspunktes im Kirchenschiff und im Außenbereich der Klosteranlage (Abb. 7). Aus diesen Daten konnten dann Aussagen über die raumklimatischen Zustände in der Klosterkirche getroffen werden.

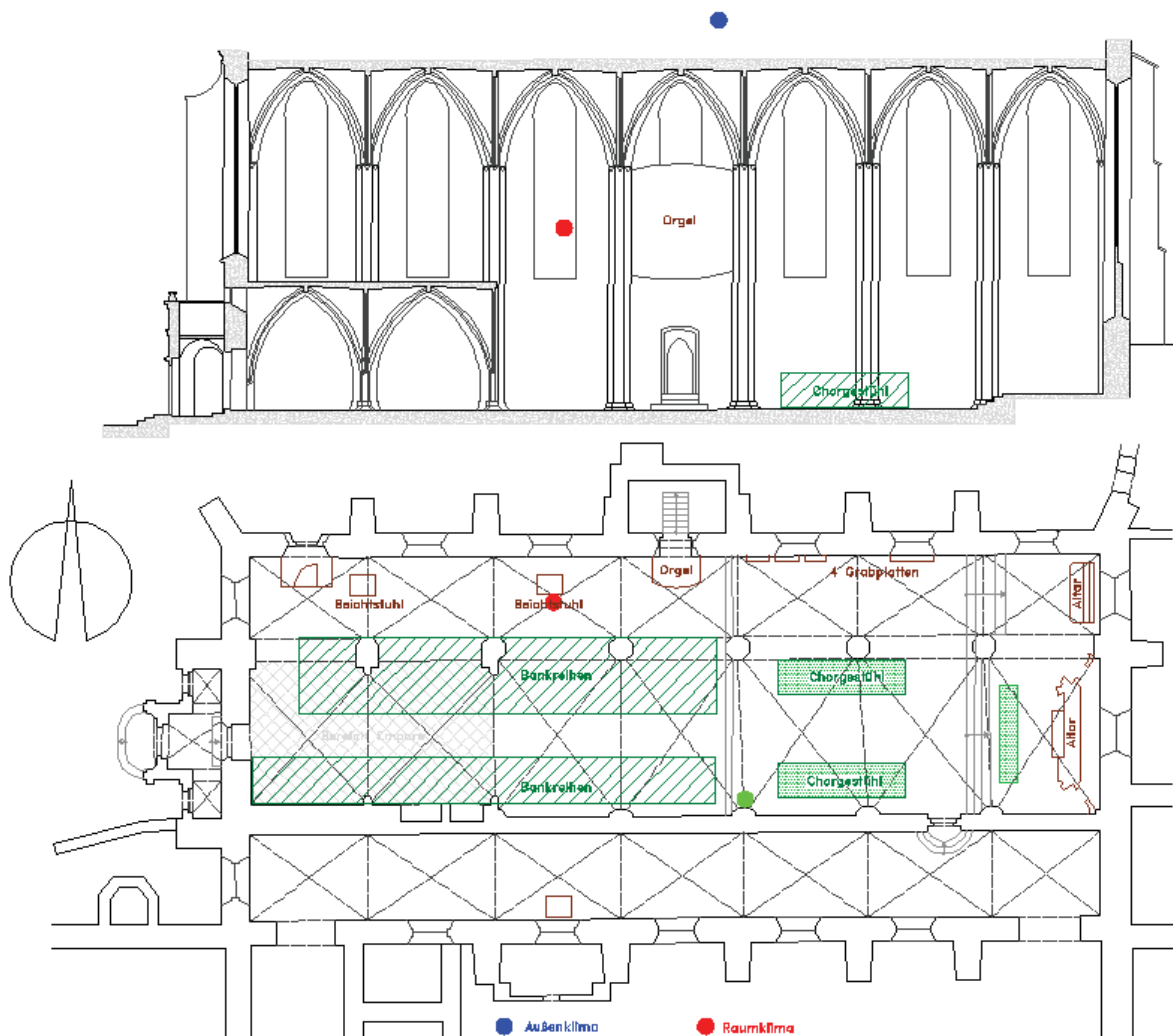


Abb. 7 Klimamesspunkte zur Langzeitaufzeichnung in der Klosterkirche  
rot: Raumklimamesspunkt Kirchenschiff / blau: Außenklimamesspunkt im Dachreiter Kirchendach  
Quelle: IDK e.V.

## 6.2 Ergebnisse der Voruntersuchung 2007 - 2008

Bei der Voruntersuchung 2007 – 2008 konnten für das Kirchenschiff folgende raumklimatische Aussagen getroffen werden. Offensichtlich wurde, dass das Innenklima nur sehr gedämpft auf die jahreszeitlichen und die täglichen Schwankungen des Außenklimas reagiert. Besonders die damalige Erwärmung der Kirche in der Heizperiode sorgte für eine deutliche Stabilisierung des Raumklimas in der Heizperiode. Die Raumlufttemperatur fiel sehr selten unter die  $+10^{\circ}\text{C}$  Marke und die relative Luftfeuchte schwankt zwischen 65 % und 85 % rel.LF (Abb. 8). Die Klimadaten als Streudiagramm dargestellt, zeigen für den Untersuchungszeitraum keine größeren Schwankungen und somit einen stabilen Raumklimabereich. (Abb. 9). Trotzdem sollten die hohen Luftfeuchtwerte von über 80 % rel.LF nicht dauerhaft akzeptiert werden.

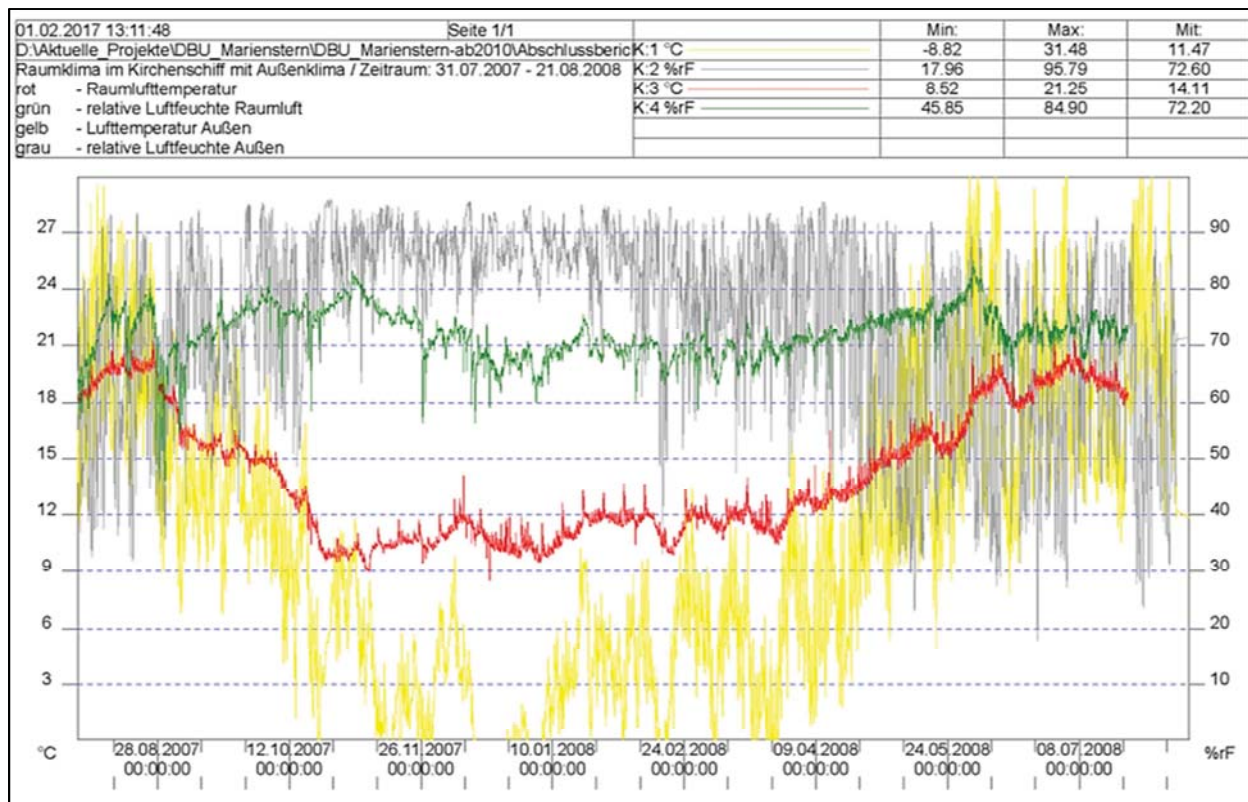


Abb. 8 Raumklima im Kirchenschiff mit Außenklima / Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008  
Quelle: IDK e.V.

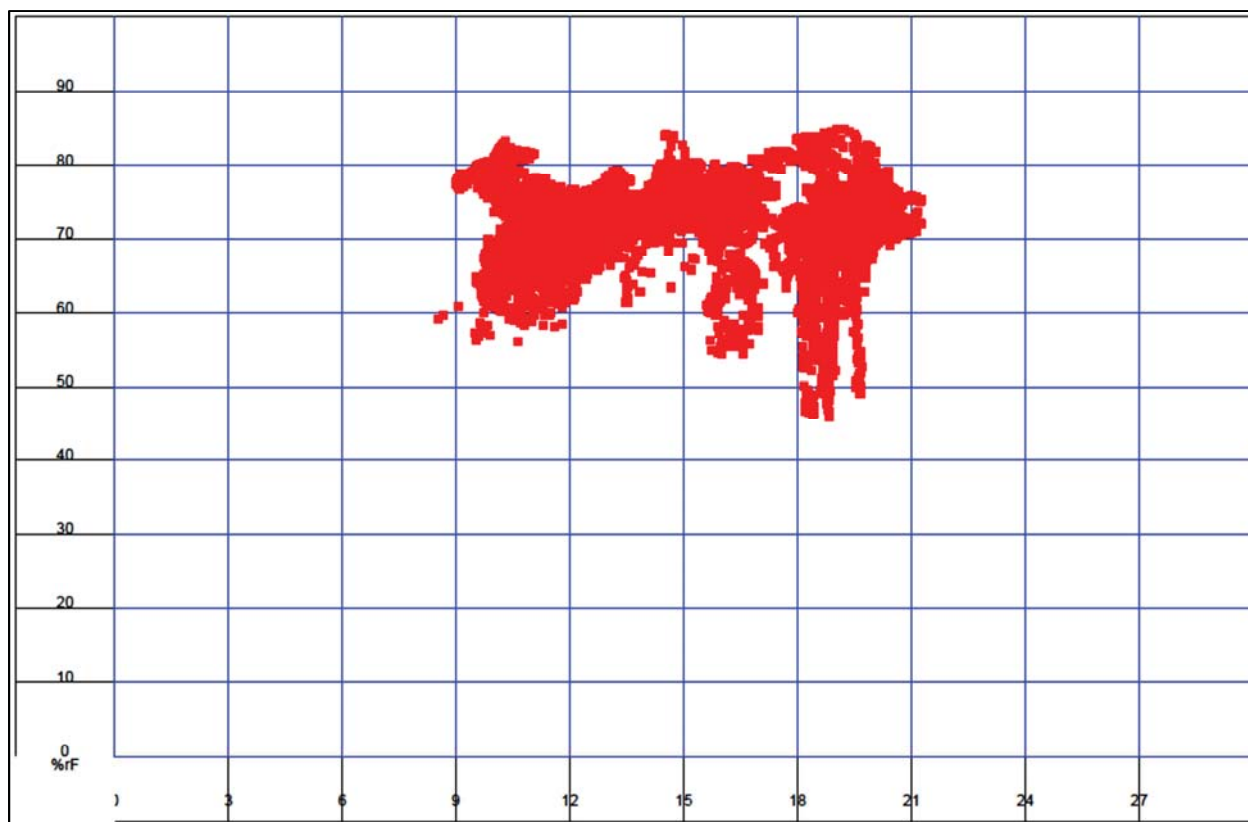


Abb. 9 Streudiagramm der Raumklimadaten im Kirchenschiff / Zeitraum: 31.07.2007 - 21.08.2008  
Quelle: IDK e.V.

### 6.3 Ergebnisse der Nachuntersuchung 2010 – 2011 und 2014 - 2016

Die Nachuntersuchung 2010 – 2011 und 2014 - 2016 erfolgten an den gleichen Messpunkten wie die Voruntersuchungen (Abb. 11, Abb. 13). Markante Änderungen durch die Veränderung der Kirchenheizung sind nicht feststellbar gewesen. Die Raumlufttemperatur liegt in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur des Winters um die 9°C und damit etwas unter den Werten der Voruntersuchung. Die relative Luftfeuchte zeigt in beiden Untersuchungszeiträumen der Nachuntersuchung einen stabileren Zustand auf, der jedoch in den Jahren 2011 – 2011 auch noch teilweise über 80 % rel.LF lag. Im Messzeitraum 2014 – 2016 wurden die 80 % rel.LF nicht überschritten. Die Klimadaten als Streudiagramm dargestellt, zeigen eine größere Schwankungsbreite bei der Raumlufttemperatur, aber deutlich geringe Schwankungen bei der relativen Luftfeuchte (Abb. 12, Abb. 14). Die recht hohen Werte der relativen Luftfeuchtwerte im Kirchenschiff von ca. 80 % rel.LF sollten dennoch nicht dauerhaft akzeptiert werden.

Wie bereits im Vorprojekt empfohlen sollte eine kontrollierte Raumlüftung für das Kirchenschiff baulich umgesetzt werden. Um temporär genutzte Gebäude besser zu belüften gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Unkontrolliertes/ natürliches Lüften ohne Technik: Hier besteht die Gefahr des „falschen Lüftens“, da der Mensch nicht in der Lage ist, Klimaverhältnisse zwischen Außen- und Raumklima richtig einzuschätzen und der Zeitraum der Belüftung oft auf die Arbeitszeit eines Werktages reduziert wird.

2. Kontrolliertes Lüften mit Technik: Die technischen Lüftungsvarianten haben den großen Vorteil, berechnete Klimaverhältnisse zu vergleichen und eine Lüftung selbstständig zu beginnen oder zu beenden. Diese Form der Beeinflussung erfolgt 24 Stunden am Tag. Sie ist jedoch mit, wenn auch geringen, Investitions-, Energie-, und Unterhaltungskosten verbunden.

Um die Luftfeuchte im Kirchenschiff, vor allem nach Veranstaltungen, dauerhaft und kontrolliert abzusenken bzw. gering zu halten, kann eine sensorgesteuerte Lüftungsanlage zum Einsatz kommen. Die Funktionsweise einer sensorgesteuerten Lüftungsanlage kann wie folgt beschrieben werden:

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Außen- und Innenluft werden von Messfühlern gemessen und an ein sich im Gebäude befindliches Steuergerät übermittelt. Das Steuergerät errechnet automatisch die absolute Luftfeuchte in Gramm je Kubikmeter Luft. Ist die absolute Feuchte innen höher als außen werden Ventilatoren oder Fensteröffner in einem individuell einstellbaren Algorithmus an- und ausgeschaltet. Während des Lüftungsvorganges kann sich die trockenere Außenluft mit der vorhandenen feuchteren Innenluft vermischen, wodurch Fußboden- und Putzflächen, sowie freiliegendes Mauerwerk Feuchte an die Raumluft abgeben können. Durch einen individuell einstellbaren Messzeitraum werden die beiden Luftbereiche per-

manent miteinander verglichen und die Lüftung gestartet oder gestoppt. Der mit einem elektrischen Verschluss in der Wand oder dem Fenster eingebaute Ventilator zieht die feuchte Luft aus dem Raum und bläst sie ins Freie. Die Ventilatoren werden so dimensioniert, dass in einem definierten Zeitraum die Raumluft einmal ausgetauscht wird. Über eine Zuluftöffnung oder ein mit einem elektrischen Fensteröffner gekipptes Fenster strömt wegen des vom Ventilator erzeugten Unterdrucks trockenere Außenluft in den Raum. Die Orte der Zuluft- und der Abluftöffnung sollten weiträumig auseinander liegen, um eine möglichst große Durchmischung der Raumluft zu ermöglichen. Dadurch soll auch verhindert werden, dass sich Raumluftbereiche bilden, die nicht belüftet werden. Mittlerweile können bei guten Steuergeräten zusätzliche Grenzwerte eingestellt werden. Somit ist eine Temperaturbegrenzung für Frostschutz oder ein Mindestwert für die relative Luftfeuchte im Raum möglich, damit z. B. eingelagerte Gegenstände nicht austrocknen. Ferner besteht die Möglichkeit der Datenaufzeichnung, welche zu empfehlen ist, um die Wirksamkeit der Durchlüftung über einen längeren Zeitraum zu kontrollieren und um Änderungen bzw. Anpassungen der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

Ein sehr wichtiger Punkt bei allen technischen Anlagen ist die Wartung und Pflege. Hier muss allen Beteiligten klar sein, dass mindestens einmal im Jahr die Technik und Sensorik zu überprüfen ist. Aber auch die erfassten Raumklimadaten müssen ausgewertet und interpretiert werden. Dies kann durch eine eingewiesene Person, entweder durch den Eigentümer, den Nutzer oder externe Fachkräfte erfolgen. Die Datenauswertung ist von besonderer Bedeutung, denn dadurch lassen sich die Auswirkungen der Raumlüftung klar belegen, bzw. können eingestellte Parameter dem tatsächlichen und sich ändernden Raumklimazustand angepasst werden.

Durch diesen gesteuerten und kontrollierten Luftaustausch kann sich die raumklimatische Situation im Kirchenschiff stabilisieren und die Luftbewegungen werden zu einem positiven Luftwechsel innerhalb des Raumes führen. Zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeit bei Veranstaltungen kann durch solch eine Belüftung sehr schnell nach außen abgeführt werden, bevor sich die Feuchtigkeit an kühleren Oberflächen der Raumhülle und der Ausstattung niederschlägt. Ein weiterer Vorteil solch einer Anlage liegt in ihrer kleinteiligen und reversiblen Bauform.

Für eine „vereinfachte Form“ dieser Lüftungsmöglichkeit würde sich der Einsatz einer sogenannten „Lüftungsampel“ (Abb. 10) anbieten. Sensoren im Anzeigegerät und im Außenbereich ermitteln die Klimawerte und zeigen durch farbige LED-Anzeigen (Ampelfarben) dem Nutzer in einem einstellbaren Messintervall eine Lüftungsempfehlung an. Durch eingewiesenes Personal kann die Empfehlungen der LED-Anzeige umgesetzt werden. Dieses technische Hilfsmittel bietet sich vor allem in Gebäuden an, bei denen eine regelmäßige Kontrolle der Lüftungsempfehlung erfolgt und aktiv umgesetzt wird. Mit Hilfe dieser Lüftungsampel kann ein „falsches“ Lüften zu klimatisch ungünstigen Zeiten vermieden werden.



Abb. 10 Lüftungsampel mit Außensensor und Anzeigegerät  
Quelle: IDK e.V.



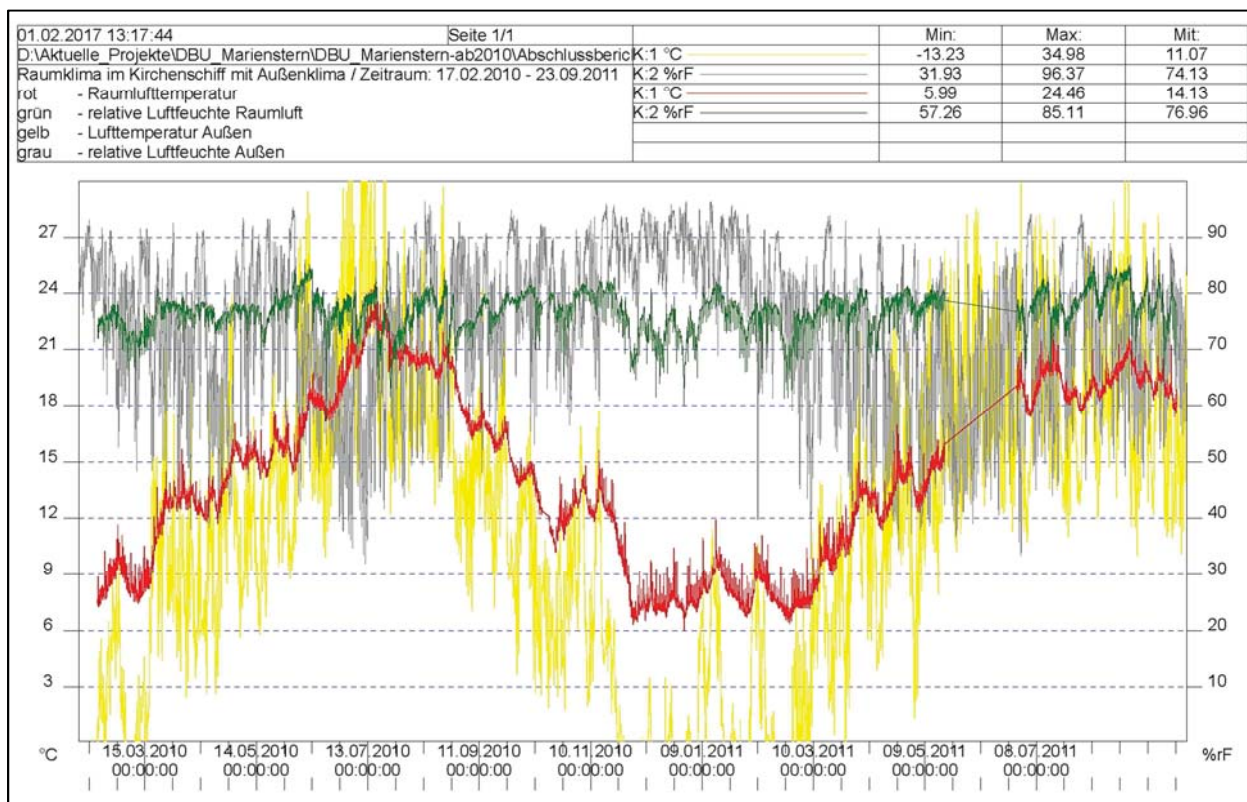


Abb. 11 Raumklima im Kirchenschiff mit Außenklima / Zeitraum: 17.02.2010 – 23.09.2011  
Quelle: IDK e.V.

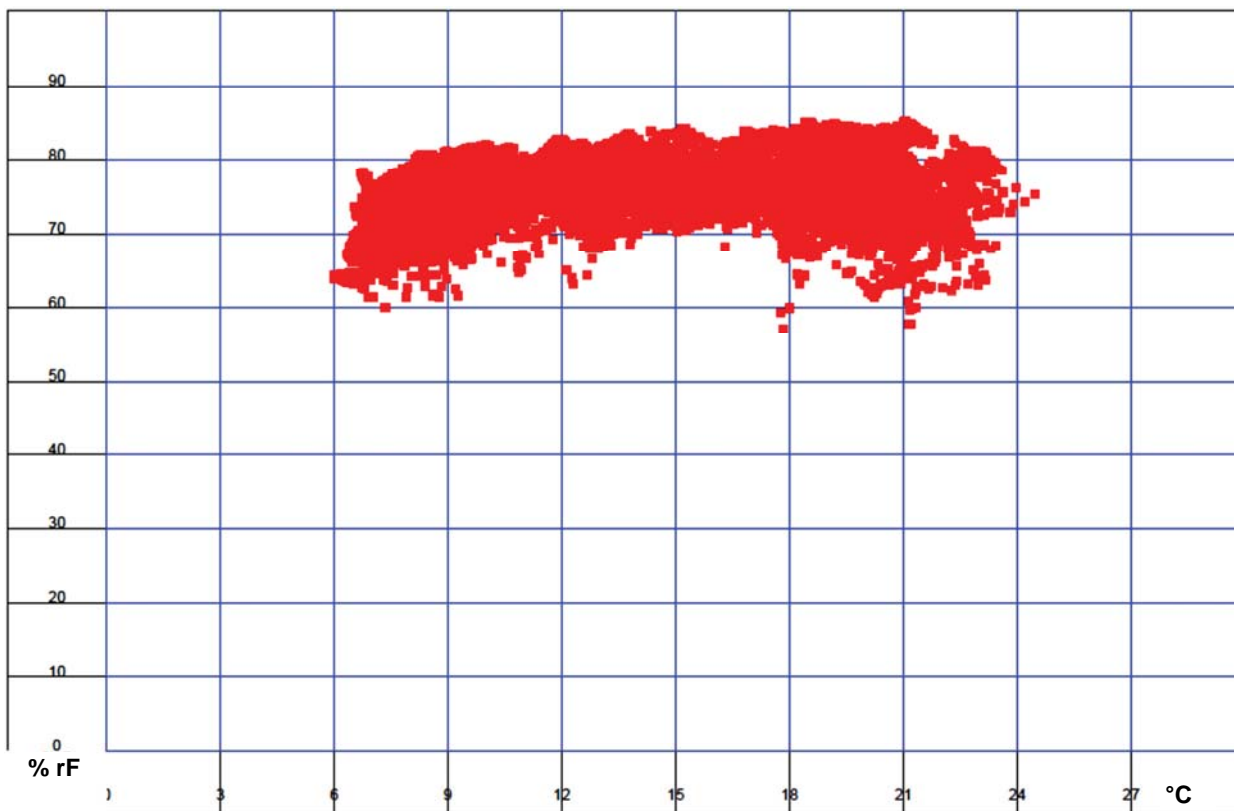


Abb. 12 Streudiagramm der Raumklimadaten im Kirchenschiff / Zeitraum: 17.02.2010 – 23.09.2011  
Quelle: IDK e.V.

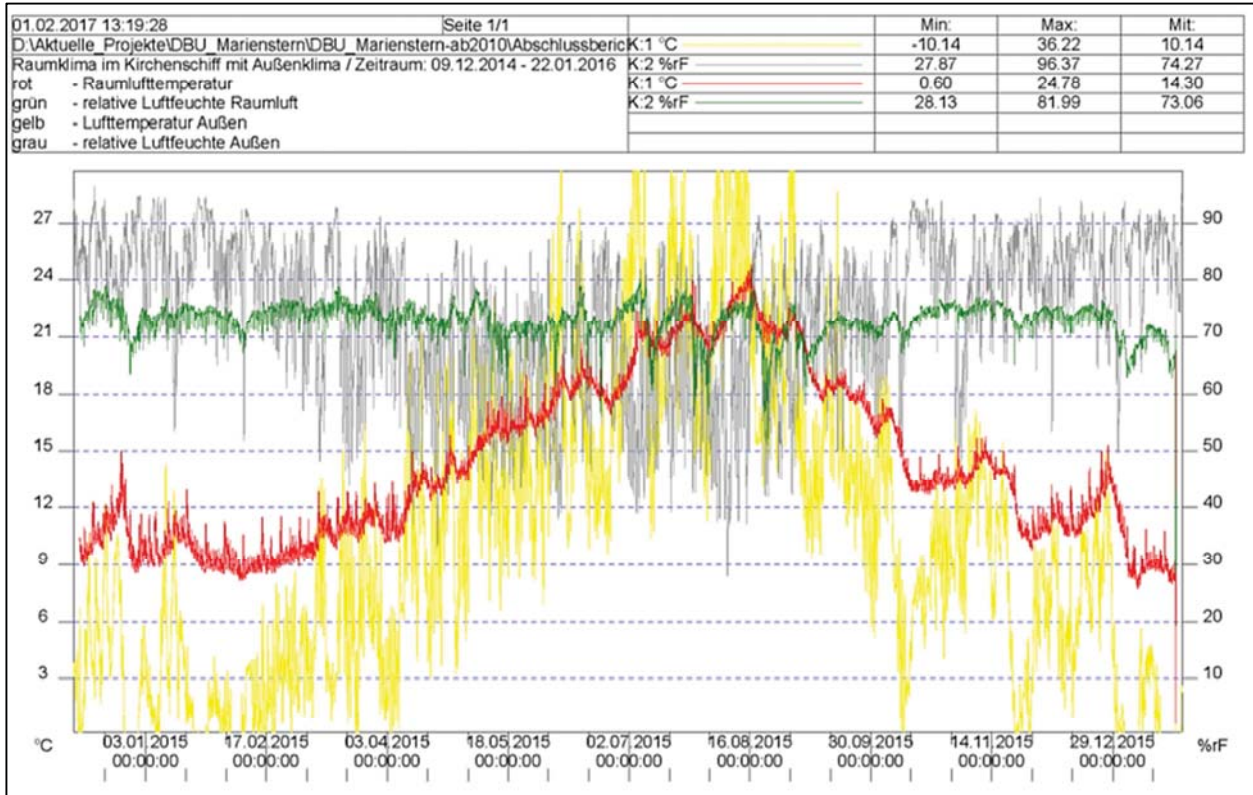


Abb. 13 Raumklima im Kirchenschiff mit Außenklima / Zeitraum: 09.12.2014 – 22.01.2016  
Quelle: IDK e.V.

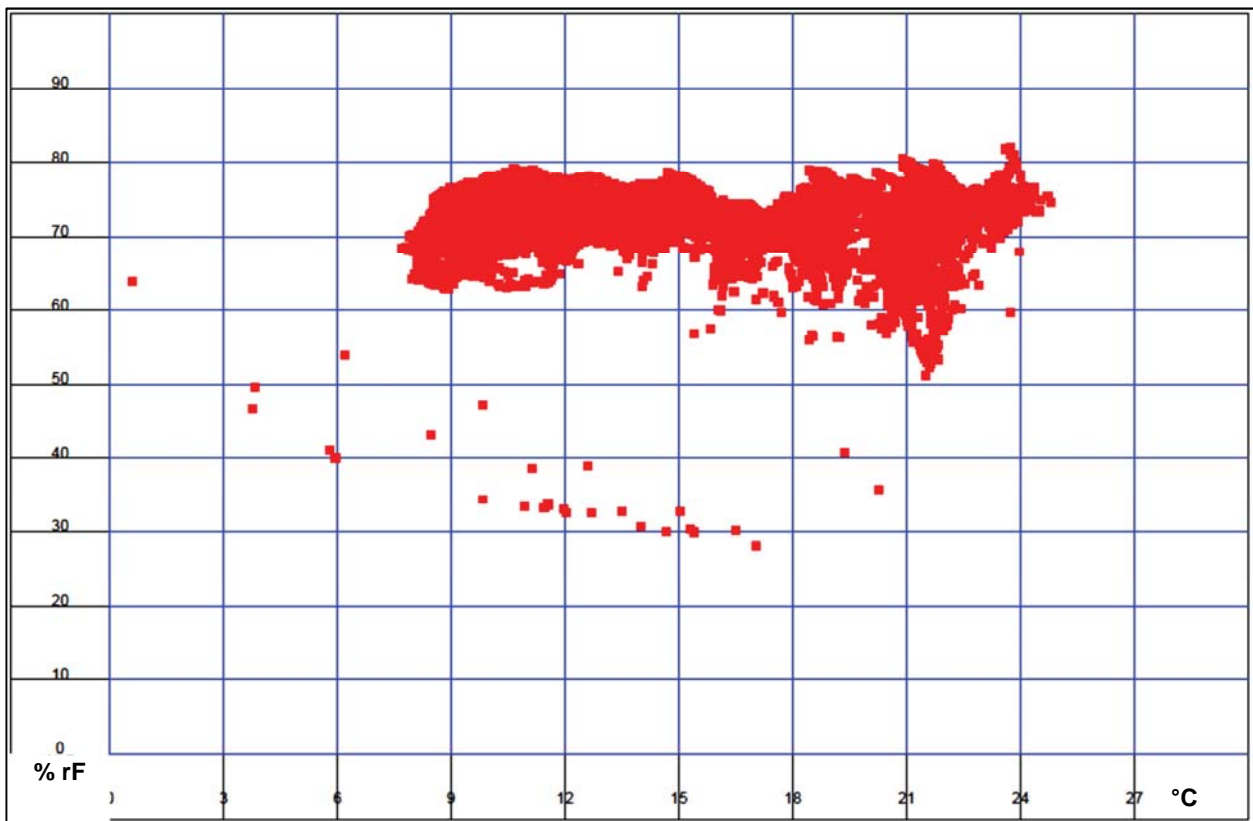


Abb. 14 Streudiagramm der Raumklimadaten im Kirchenschiff / Zeitraum: 09.12.2014 – 22.01.2016  
Quelle: IDK e.V.

## 7 Energieverbrauch Klosterkirche

### 7.1 Empfehlungen aus dem Vorprojekt 2007 - 2008

Wenn auf eine bestimmte Temperatur im Winter geheizt wird (Raumsolltemperatur = 10°C) stellt sich ein gewisser 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 einem mittleren Testreferenzjahr, einem Luftwechsel von 0,2 h<sup>-1</sup> und einer begrenzten Heizleistung von 81 kW (293 MJ/h) zeigen, dass die Heizungsanlage in der Lage ist die geplanten 8 - 10 °C Raumtemperatur aufrecht zu halten. Bei einem geringeren Luftwechsel von 0,1 h<sup>-1</sup> und dem angesetzten Testreferenzjahr kann die Raumtemperatur von 8 - 10°C auch mit 50 kW Heizleistung erbracht werden. Wenn die Luftwechselzahl allerdings auf 0,5 pro Stunde angehoben wird, ist die Raumlufthilfstemperatur von 10°C bei geringen Außentemperaturen mit einer 50 kW Heizung nicht zu halten.

Bei den im Vorprojekt 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 zukünftige Heizung mit einer Sicherheit- oder Reserveleistung zu versehen oder in einem späteren Stadium der Planung mit extremeren Randbedingungen erneut zu rechnen und mit dem Nutzer zu diskutieren. Entscheidend für den Energiebedarf ist die mittlere Raumlufthilfstemperatur während der kalten Jahreszeit im Kirchenraum. Die Differenz zwischen dieser mittleren Raumlufthilfstemperatur 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 Raumlufthilfstemperatur erreicht werden. Dies ist in Tabelle 2 für die Kirche dargestellt.

Tabelle 2 Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Innenraumtemperaturen (n = 02. h<sup>-1</sup>)  
Quelle: IDK e.V.

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

Neben der Temperaturdifferenz hat die Dauer der Heizzeit Einfluss auf den Energiebedarf. Die Heizzeit verlängert sich mit steigenden Innentemperaturen.

Die Länge der Heizperiode ist abhängig von der Innenraumtemperatur. Je höher diese ist, desto länger ist auch die Zeit in der geheizt werden muss. Die 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 h<sup>-1</sup> ergibt eine errechnete Heizleistung von 81 kW. Die gemessenen Verläufe des Innenklimas konnten rechentechnisch durch ein Simulationsprogramm

nachvollzogen werden. Damit gilt die rechen-technische Gebäudebeschreibung als qualifiziert und war für weitere Untersuchungen geeignet.

Mit einem einfachen neu in TRNSYS integrierten Berechnungsmodul kann das Feuchtespeicherverhalten der Umfassungskonstruktion hinreichend genau abgebildet werden. 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. Die Energieeinsparung, die aufgrund einer möglichen Gewölbedämmung (10 cm Wärmeleitgruppe 040) im 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 und die Strahlungsasymmetrie im Raum positiv. Bei einer weiteren Reduzierung der Raumsolltemperatur sind an der Gewölbeunterseite keine überhöhten Raumluftfeuchten zu erwarten.

## **7.2 Erfahrungen aus dem aktuellen Projekt**

Die in der Klosterkirche in den Jahren 2011 und 2012 durchgeführten Messungen sind nicht umfassend und damit auch nicht vollumfänglich aussagekräftig, deuten aber auf die Richtigkeit der Simulationsrechnungen aus dem Vorprojekt hin. Anliegen bei allen Untersuchungen war die Verbesserung der Behaglichkeit im Bereich des Chorgestühls. Dementsprechend wurde versucht, Temperaturen in diesem Bereich zu erfassen. Diese Temperaturen sind nicht repräsentativ für den gesamten Kircheninnenraum. Messdaten in allen Bereichen und Ebenen der Kirche konnten aufgrund des eingeschränkten finanziellen Rahmens (Verfügbarkeit / Beschaffung Messtechnik) nicht erhoben werden. Darüber hinaus kann in der Kirche aufgrund bereits an anderer Stelle beschriebener Undichtheiten (Türen nach außen und zu anderen Bereichen) kein definierter Luftwechsel eingestellt und über einen längeren Zeitraum eingehalten werden. Wenn auch die Außentemperaturen erfasst wurden, so fehlen konkrete Aussagen zu einer während der Untersuchungszeit durchaus vorhandenen solaren Einstrahlung, die zumindest partiell zu einer Aufwärmung der Kirche durch Strahlung (Erwärmung der inneren Oberflächen und bestrahlten „Körper“) mit anschließender konvektiver Wärmeübergabe an die Raumluft.

Die berechneten zugeführten Heizleistungen wurden als Mittelwert einer über den Zeitraum „ $\Delta\tau$ “ aufgezeichneten Heizarbeit berechnet. Die Messungen belegen die zugeführten Leistungen kleiner 60 kW an allen Messtagen. Damit sind die in den Simulationsrechnungen ausgewiesenen 81 kW als maximaler Wert bestätigt und die Richtigkeit der theoretischen Betrachtungen bestätigt.

Messtechnische Betrachtungen während einer Anheizphase (instationärer Zeitraum) wurden nicht durchgeführt.

# **8 Reduzierung von Raumluftströmungen und Minimierung von Fallluftströmungen an Kirchenfenstern**

## **8.1 Einführung**

Die Raumluftströmung in einem Gebäude bzw. in einem Raum ist ein sehr komplexer Vorgang. Speziell an die raumluftechnischen Anlagen werden besondere Anforderungen gestellt, um eine Zugluftbelastung beim Nutzer auszuschließen. Durch eine ständige Weiterentwicklung der CFD-Simulationsprogramme können Strömungssituationen im Inneren von Gebäuden bestimmt

und beeinflusst werden. Bei der Literaturrecherche über Raumluftrömungen, speziell über Fallluftrömungen an Fenstern, war auffallend, dass von 1980 bis zur Jahrtausendwende nur eine geringe Anzahl von wissenschaftlichen Publikationen vorhanden ist. Durch den Trend in der Architektur zu Glasflächen als Gebäudehülle und mit der Entwicklung des Passivhauses sind vermehrt wieder wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt worden. Die Klosterkirche kann mit keinem gewöhnlichen Standardgebäude verglichen werden, vgl. folgende Tabelle 3.

Tabelle 3 Klimatisierung eines Büroraumes als Gegenüberstellung  
Quelle: In Anlehnung an Großmann, Holger (2010)

<b>Kenngroße</b>	<b>Büroraum</b>	<b>Klosterkirche St. Marienstern</b>
Volumen	ca. 30 m <sup>3</sup>	ca. 11900 m <sup>3</sup>
Glasfläche Fenster	ca. 7 m <sup>2</sup>	Nordwand ca. 117 m <sup>2</sup>
Betriebsweise	Stationär	Instationär
Deckenhöhe	~2,80 m	~ 18,50 m
Lufttemperatur	15 - 30 °C	6 - 8 °C
Oberflächentemperatur	15 - 40 °C	6 - 8 °C
Temperaturfeld	Nahezu homogen	Inhomogen
Strömungsfeld	Nahezu homogen	Inhomogen

Durch die gewaltigen Ausmaße dieses Raumes und der großen Höhe entstehen Raumluftrömungen allein schon durch Luftdruckunterschiede. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Bleiglasfenster, insbesondere aber die Türen eine geringe Dichtheit der Gebäudehülle nach sich ziehen, was zu weiteren Luftbewegungen führt.

## 8.2 Messtechnische Erfassung der Luftströmungen

Die Methoden zur Bestimmung von Raumluftrömungen können grundsätzlich unterteilt werden in:

- empirische Methoden
- experimentelle Methoden
- mathematische bzw. mathematisch-numerische Methoden

Die Klosterkirche ist ein sehr großer und komplexer Raum. Daher bietet sich für die Untersuchung der Raumluftrömung nur eine qualitative experimentelle Methode an. Mit einer Nebelmaschine wird die Strömung sichtbar gemacht und mit einem Videogerät dokumentiert. Der Nebel hat keine aggressive oder toxische Wirkung. Anhaftungen an festen Oberflächen sind äußerst selten und wurden bei vergleichbaren Untersuchungen nicht festgestellt. Die Nebelteil-

chen weisen eine sehr geringe Sinkgeschwindigkeit auf und gestatten damit eine ausreichend lange Beobachtung der Luftströmung. Die Nebelversuche wurden in der Klosterkirche durchgeführt.

Bei den Strömungsuntersuchungen wurde vorwiegend der Nord-Ostteil der Klosterkirche geprüft. Im Vorfeld wurde eingeschätzt, dass dieser Bereich mit den beiden großen nordseitig orientierten Fenstern (in unmittelbarer Nähe des Hussitenfensters) die Strömung am Chorgestühl maßgeblich beeinflusst. Gleichzeitig konnte die Wirksamkeit der Windschotts an diesen beiden Fenstern Nordfenstern betrachtet werden. Zudem wurden für die Lokalisierung einzelner Probleme Untersuchungen in verschiedenen Ebenen durchgeführt. Mit dem Ziel, Aussagen über reale Luftgeschwindigkeiten im Chorgestühl zu erhalten, wurde ein sehr kleines Flügelradanemometer eingesetzt. Ebenfalls als sehr anschaulich erwiesen sich Rauchstifte, die lokale Untersuchungen am Chorgestühl zuließen.

### 8.3 Strömungsmodell Klosterkirche

Um ein aussagekräftiges Strömungsmodell der Kirche zu erstellen, war es wichtig, dass bei den Messungen besonders starke Strömungen vorherrschten. Ein maßgeblicher Faktor war hierbei die Außentemperatur. Die umfangreichsten Nebelversuche fanden am 23.02.2011 bei Außentemperaturen von  $-11\text{ °C}$  und Raumtemperaturen (operative Temperatur) von durchschnittlich  $7\text{ °C}$  statt (Abb. 15).



Abb. 15 Nebelversuch zur Visualisierung von Raumluftrömungen in der Klosterkirche  
Quelle: IDK e.V.

Dokumentiert wurden die Versuche durch Videoaufnahmen. Obwohl die Hauptuntersuchung an nur einem Tag stattfand, ist davon auszugehen, dass aufgrund der relativ konstanten Bedingungen in der Kirche (Fenstersituation, Möblierung, Beleuchtung, Personen) wesentliche Strömungssituationen über das gesamte Jahr unverändert sind. Unbestritten ist auch, dass sich einzelne Bereiche bei veränderten Temperaturbedingungen (Temperaturdifferenz zwischen außen und innen) differenziert darstellen. Um speziell für die kalten Außentemperaturen eine länger Beobachtungsphase zu garantieren, wurde zusätzlich ein Fragebogen für das Kloster

erstellt. Die ausgearbeiteten Angaben geben jedoch das gleiche Bild wie bei den Nebelversuchen.

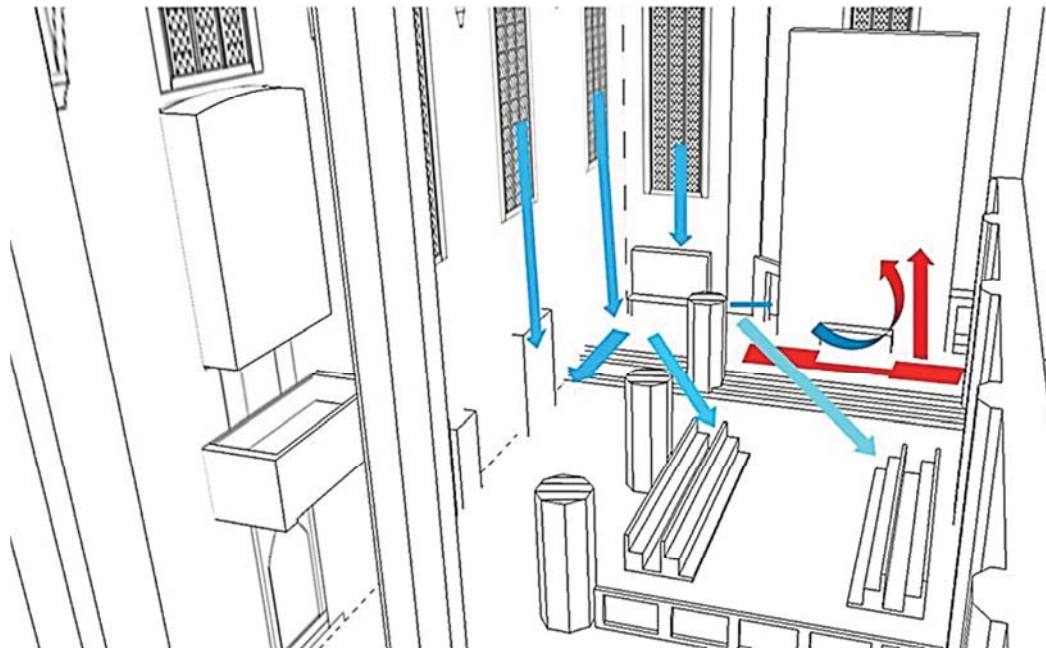


Abb. 16 Strömungsmodell Klosterkirche  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Die gewonnen Erkenntnisse werden in einem Strömungsmodell (siehe Abb. 16) dargestellt und näher erläutert. Die kalten Luftströmungen treten vorwiegend unter den Fenstern der Nordwand sowie der Ostwand (Hussitenfenster) auf. Am stärksten ist der Kaltluftabfall in der Ecke zwischen dem Hussitenfenster (Ostwand) und dem letzten Nordfenster. Von dieser Stelle aus verteilt sich die kalte Raumluft vollflächig im Kirchenraum. Die Kaltluftvolumenströme der Nordwandfenster addieren sich und verleihen dem Hauptstrom einen zusätzlichen Impuls. Es kommt zu einer Verschiebung der Strömung in Richtung Chorgestühl. Die stärkste Luftströmung wurde in einer Höhe von 1,5 m – 2 m festgestellt. Dieser Luftstrom verursacht, abhängig von der Sitzordnung der Nonnen, eine Zegerscheinung jeweils im Nacken oder in den Gesichtsflächen der Schwestern. Im Raum hinter dem Hochaltar befindet ein (mittels Tür) abgeschlossener Raum mit einem Heizkörper. Ein Teil der kalten Luft strömt durch die geöffnete Tür in diesen Raum (kleiner blauer Pfeil). Bei Nebelversuchen in diesem beheizten Raum wurde folgendes festgestellt:

- Der aus dem Kirchenraum eintretende Luftstrom ist so groß, dass keine warme Luft (sichtbar gemacht durch Nebel) an dieser Seite austritt. Die erwärmte Luft steigt bis kurz unter die Sohlbank auf. Danach wird diese aufsteigende Luftmasse durch den Kaltluftabfall vom Fenster wieder nach unten gedrückt. Es entsteht eine Verwirbelung. Vor dem Altar ist eine Fußbodenheizung verlegt; die entsprechende Fußbodenfläche war erwärmt. Es kommt somit zur Überlagerung von zwei Strömungen. Im Ergebnis steigt die Strömung rechts vor und hinter dem Hochaltar in Richtung Gewölbedecke auf.

Da für den Heizkörper hinter dem Hochaltar keine Wirksamkeit gegen den unangenehmen Kaltluftfall nachgewiesen wurde, kann eine Außerbetriebnahme/ein Rückbau erfolgen. Bei Untersuchungen der einzelnen Fenster auf Kaltluftströmung konnte am Hussitenfenster ein sehr starker Kaltluftabfall festgestellt werden. Dieser wurde durch eine zusätzliche Messung am

28.03.2011 nochmals eingehender untersucht. Abschließende Versuche wurden an der Verbindungstür zwischen Kreuzgang und der Kirche durchgeführt. Hierbei wurden keine Auffälligkeiten festgestellt.

Untersuchungen der Luftgeschwindigkeit mit dem Flügelradanemometer ergaben am Chorgestühl eine Größenordnung von  $w = 0,4 \frac{m}{s}$ .

#### 8.4 Entstehung von Fallluftströmungen

Ausgehend vom Gebäude gibt es einen Wärmeverlust über alle drei Koordinatenrichtungen. Das bedeutet, dass die durch Heizung eingebrachte Energie über die Umfassungskonstruktion (Fußboden, Deckengewölbe, Wände, Fenster usw.) verloren geht. Besonders im Fensterbereich ist der Wärmeverlust hoch. Hierbei kühlen durch niedrige Außentemperaturen die Glasflächen sowie besonders die Metallträger der einzelnen Fensterelemente schnell ab. Die folgende Tabelle 4 zeigt die Wärmeleitkoeffizienten der an dieser Stelle verbauten Materialien auf und verdeutlicht das rasche Abkühlungsverhalten.

Tabelle 4 Wärmeleitfähigkeit  
Quelle: Schmidt, Gerd-Dietrich (1996)

Bezeichnung	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]
Blei	35
Glas	0,76

Die in der Klosterkirche befindliche erwärmte Luft kühlt sich an diesen Flächen ab. Die abgekühlte Luft weist eine größere Dichte auf als die Warmluft in der Kirche. Die Kaltluft sinkt folglich ab. In der Strömungslehre wird dies als natürliche Luftströmung bei freier Konvektion an einer senkrechten Platte bezeichnet. Werden die Strömungsverhältnisse unter den folgenden Bedingungen betrachtet, können die Strömungsformen aus der Abb. 17 angenommen werden.

- Luftbewegung wird nur von der wärmeübertragenden Fläche verursacht
- Strömungsverlauf wird nur zweidimensional betrachtet
- Zeitlich und örtlich konstante Oberflächentemperatur
- Zeitlich und örtlich konstante Raum- und Umgebungstemperatur



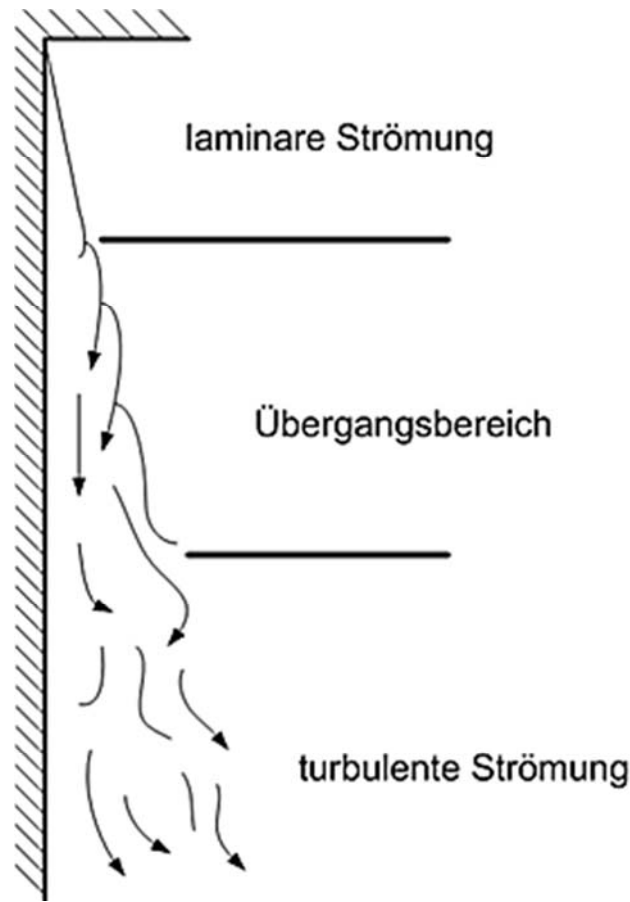


Abb. 17 Strömungsformen bei freier Konvektion  
Quelle: In Anlehnung an Kriegel, Bernd (1973)

Die Strömung wird in drei Bereiche unterteilt. Dabei bewegen sich am Beginn der laminaren Strömung alle Luftmoleküle parallel zu der Oberfläche. Eine Vermischung der Strömung findet nicht statt. Mit zunehmender Länge nimmt die Dicke der Strömung zu. Im zweiten Bereich findet ein Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung statt. In der dritten Zone tritt die turbulente Strömung auf. Dabei unterliegen die Luftmoleküle keiner Ordnung mehr. Die Schichtdicke der Strömung nimmt deutlich zu und trifft auf den Fußboden. Hier wird die Strömung umgelenkt und breitet sich ganzflächig aus. Kommt es dann zu einer besonders großen Ansammlung von kalten Strömungen am Boden kann dies als „Kaltluftsee“ bezeichnet werden. Im Zusammenhang mit aktiven Heizflächen bilden sich Raumluftrömungen, die dem Wechselspiel zwischen Abkühlung (einerseits) und Erwärmung (andererseits) unterliegen.

### 8.5 Besonderheiten am Kirchenfenster St. Marientern

Bei der Betrachtung der Kirchenfenster zeigt sich ein besonderes Merkmal. Die Fensterbank ist nicht horizontal, sondern fällt schräg zum Raum hin ab. Dadurch erscheinen die Fenster größer. Der Nachteil dieser Anordnung ist in der folgenden Abb. 18 zu sehen. Der an den kalten Fensterflächen entstandene Fallluftstrom wird durch die Schräge in den Raum abgeleitet. Die Unterkante der Fensterbank befindet sich auf einer Höhe von etwa 6,70 m. Die Strömung bekommt durch die Schräge einen Impuls und strömt durch die zeitige Ablenkung weiter in den Raum hinein.

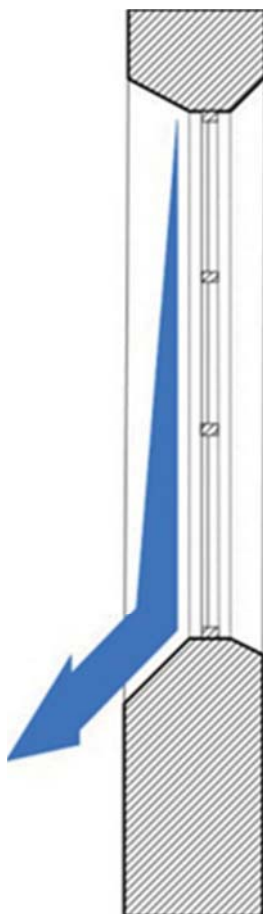


Abb. 18 Schnittansicht Kirchenfenster / Kaltluftabfall  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Ein weiteres Merkmal der Kirchenfenster ist deren Struktur bzw. deren Fertigung unter ausschließlicher Verwendung von Bleiglas. Der Einsatz von Blei (H-förmige Bleiruten nehmen die Scheiben auf) hat den Nachteil, dass sich die Wärmeleitfähigkeit der Fensterfläche erhöht. Durch die überstehende Bleistruktur ist im Fensterbereich mit keinem laminaren Strömungsfeld zu rechnen. Undichtigkeiten im Bereich der Fenster können den ohnehin hohen Turbulenzgrad der Strömung weiter erhöhen. Unter günstigen Bedingungen (abhängig vom Sonnenstand) wirken diese Fenster den Fallströmungen entgegen. Die Bleistege können, anders als das reine Glas, Strahlungswärme aufnehmen und diese gut nach innen leiten. Die aufsteigende freie Konvektion wirkt dann den Fallströmungen entgegen. An sonnigen Wintertagen wird an den nach Süden gerichteten Fenstern im Kreuzgang keine bzw. eine geringe Fallströmung nachzuweisen sein. Im Winter kann es durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Materials zur Eisbildung an den Innenflächen der Fenster kommen. Verdeutlicht werden diese Aussagen durch die folgende Abb. 19. Die dargestellten Temperaturwerte sind über den jeweiligen Tag gemittelt.

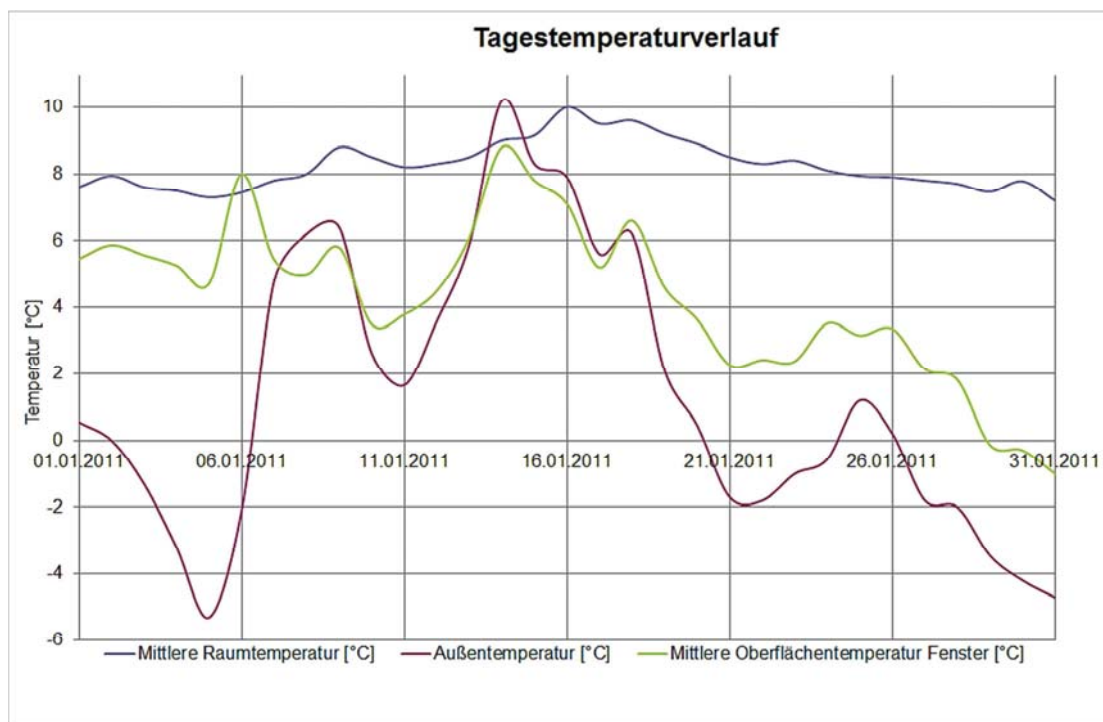


Abb. 19 Temperaturverlauf im Januar 2011  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Für den 06.01.2011 ist zu erkennen, dass bei einer Außentemperatur von -2 °C die Oberflächentemperatur des Fensters durch Sonneneinstrahlung gestiegen ist. Ebenso sinkt am Ende des Monats die Oberflächentemperatur des Fensters unter den Gefrierpunkt.

Abschließend soll das Hussitenfenster genannt werden, welches im Aufbau eine Ausnahme in der Klosterkirche darstellt. Hier ist ein Bleiglasfenster mit einer Schutzverglasung versehen. Die Besonderheit ist, dass die Bleiverglasung an dem unteren Rand nicht abschließt (siehe folgende Abb. 20). Dieser Spalt ermöglicht eine Belüftung des Zwischenraums. Die sich ausbildende Zirkulation schützt das Fenster vor zu hoher Feuchtigkeit.



Abb. 20 Hussitenfenster mit Spalt zwischen Schutzverglasung und historischer Verglasung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

## 8.6 Berechnung der Fallluftströmung

Die Literaturrecherche ergab, dass die einzelnen Problemstellungen sehr komplex sind. Es kommt zu keiner einheitlichen Betrachtungsweise. So stellt [Kriegel, Bernd (1973)] fest, dass es auch für den laminaren Bereich nicht möglich ist, eine analytische Lösungsmöglichkeit für den Wärmeübergangskoeffizienten zu finden. Eine interessante Auflistung ist in [Kriegel, Bernd (1973)]. zusammengestellt, die den Wissenstand bis 1970 aufzeigt. Darin wird festgestellt, dass es zu keiner Allgemeingültigkeit in den untersuchten Fällen kommt. Weiterhin stellt er darin fest, dass die bislang aufgestellten Berechnungsverfahren nicht zweifelsfrei zu übernehmen sind. In [Krull, Diethelm (2009)] werden vereinfachte Gleichungen von [Andersen K.T.] aufgezeigt, die für Abschätzungen in den Planungsphasen angedacht sind. Dabei muss beachtet werden, dass in diesem Fall die gesamte Strömung als laminar angenommen wird. Es zeigt sich aber, dass Größen wie Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsverlauf) sowie Massestrom für derartige Berechnungen definiert werden müssen. Es sei darauf verwiesen, dass dabei nur der interessante turbulente Bereich aufgezeigt wird. Diese Betrachtungen sind wichtig, um in einem späteren Kapitel auf Gegenmaßnahmen einzugehen und diese zu bewerten.

Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass trotz der gut strukturierten Arbeit von [Kriegel, Bernd (1973)] kein genauer Bezug auf das aktuelle Problem geschaffen werden kann, da die Randbedingungen sowie die Fensterstruktur eine ganz andere ist, als in den Versuchen. Die Gleichungen gehen von einer isothermen Abkühlungsfläche aus, alle benötigten Stoffwerte werden gemittelt. Dennoch sind aus den Ergebnissen von [Kriegel, Bernd (1973)] die besten Abschätzungen zu entnehmen.

Für die Berechnung der maximalen Geschwindigkeit gilt:

$$w_{\max} = \frac{1,25 \cdot Gr^{0,45} \cdot \nu}{B} \quad (2-1)$$

Die Berechnung der Grenzschichtdicke bei einem Wandabstand von  $x = \frac{1}{2} w_{\max}$  lässt sich aus folgender Gleichung bestimmen:

$$\delta_2 = 0,37 \cdot Gr^{-0,1} \cdot B \quad (2-1)$$

Für die gesamte Grenzschichtdicke gilt:

$$\delta = \frac{1}{3} \delta_2 \quad (2-2)$$

Die mittlere Temperatur der Grenzschicht bestimmt sich aus:

$$\frac{\bar{T} - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} = 0,274 \cdot Gr^{-0,017} \quad (2-3)$$

Der Massestrom wird aus folgender Gleichung bestimmt:

$$\dot{m} = 0,536 \cdot \nu \cdot B \cdot Gr^{0,35} \quad (2-4)$$

Für die theoretische Betrachtung dieser Arbeit wurde der Wärmedurchgangskoeffizient für das Bleiglasfester benötigt. Dieser wurde überschlägig berechnet und beträgt:

$$U_{\text{Bleiglasfenster}} = 5,86 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2-5)$$

Die erste Annahme, dass der Wert deutlich über der Einfachverglasung liegt, konnte mit der Rechnung nicht bestätigt werden. Eine genaue Bestimmung kann nur mit einem speziellen Messverfahren erfolgen. Es soll deshalb mit der Näherung weiter gearbeitet werden. Da die reale Oberflächentemperatur vom Fenster nur an einem Messpunkt bestimmt wird und bei der berechneten Oberflächentemperatur das Temperaturfeld als homogen betrachtet wird, sind gewisse Differenzen zu erwarten.

### Gegenmaßnahmen

In diesem Kapitel sollen alle Gegenmaßnahmen aufgezeigt werden, die eine Verminderung des Kaltluftzufalls ermöglichen. Dabei wird zwischen aktiven (mit Energieaufwand) bzw. passiven Maßnahmen (ohne Energieaufwand) unterschieden.

## **8.7 Aktive Gegenmaßnahmen - Fenster**

### Warmluftzufuhr

Um die kalte Fallströmung wirksam zurückzuhalten, wird an der Unterkante der Fensterfläche ein nach oben gerichteter Warmluftstrahl eingeblasen. Die Warmluft muss über die ganze Breite des Fensters mit möglichst gleichmäßiger Temperatur und Geschwindigkeitsverteilung vertikal eingeblasen werden. Dabei könnten verschieden Bauformen der Schlitzauslässe verwendet werden. Laut [Kriegel, Bernd (1973)] ist die zweckmäßigste Bauform ein Auslass mit schmaler Schlitztiefe, wenn der Massenstrom der eingeblasenen Luft gering sein soll. Erforderliche Einblasgeschwindigkeit sowie Wärmezufuhr sollen in den nachfolgenden Gleichungen genannt werden. Die Einblasgeschwindigkeit ergibt sich aus:

$$w_o = \frac{w_{\max}}{\left(\frac{x}{x_o}\right)^{-0,47}} \quad (2-6)$$

Dabei sollte nach Empfehlungen die Endgeschwindigkeit an der Fensteroberkante nicht unter

$$w_{\max,L} = 0,6 \frac{m}{s} \text{ liegen.}$$

Die zum Ausgleich der Verluste erforderliche Wärmeleistung speziell am kalten (Kirchen-) Fenster wird aus folgender Gleichung berechnet:

$$\dot{Q}_{ko} = c_p \cdot \rho_o \cdot w_o \cdot h \cdot (T_\infty - T_W) \left[ e^{\frac{0,455 \cdot \lambda}{c_p \cdot \rho_o \cdot w_o \cdot h} \left(\frac{w_o \cdot B}{v}\right)^{\frac{4}{5}} \left(\frac{B}{h}\right)^{-\frac{3}{5}}} - 1 \right] \cdot l \quad (2-7)$$

Die innere Oberflächentemperatur des Fensters ist abhängig von der Außentemperatur. An dieser Stelle wird vorgeschlagen, Ausblasgeschwindigkeit sowie Wärmeleistung auf Basis der in DIN 12831 fixierten Normaußentemperatur (Kamenz) auszulegen. Bedarfsgerecht können in Verbindung mit einem Außentemperaturfühler die Geschwindigkeit geregelt und die Wärmeleistung zugeführt werden.

Nachfolgend soll in der Tabelle 5 alle Vor- und Nachteile in Bezug auf die Klosterkirche aufgezeigt werden.

Tabelle 5 Vor- / Nachteile der Warmluftzufuhr

Vorteile	Nachteile
Baugröße des Verteilerkanals (Düse) ist unauffällig am Fenster	Warmluft und Staub belasten das Inventar sowie die Gebäudehülle
Wirksamer Schutz vor Kaltlufteinfall	Geräuschentwicklung
	Hoher Energieverbrauch
	Durch unebene Fensterfläche muss Eintrittsgeschwindigkeit erhöht werden
	Umbaumaßnahmen an der Fensterbank bzw. im Kirchenraum
	Versorgungsleitungen müssten im Fußboden und in der Wand verlegt werden

### Heizflächen

Eine mittels Heizfläche erwärmte Luft strömt in freier Konvektion nach oben (unter Ausnutzung des Dichteunterschieds) und wirkt hierbei der Kaltluftströmung entgegen. Die Heizflächen (der Heizkörper) sollte auch bei dieser Variante über die gesamte Breite der Abkühlungsfläche angeordnet werden. Eine gleichmäßige Wärmeabgabe der Heizfläche sowie die ungehinderte Luftan- und -abströmung sind Voraussetzungen für eine ordnungsgemäße Funktion.

Weiterhin muss die zugeführte Wärmemenge größer sein als die des Kaltluftstroms, um eine vollständige Abdeckung bis zur Fensteroberkante zu garantieren. Dabei gilt:

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} > \dot{Q}_{\text{Fallluft}} \quad (2-8)$$

Anhand von Gleichung aus [Kriegel, Bernd (1973)] lässt sich die benötigte Heizleistung wie folgt bestimmen:

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} = 0,118 \cdot \lambda \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot (T_{\infty} - T_W) \cdot l \quad (2-9)$$

In den Untersuchungen von [Kriegel, Bernd (1973)] wurde für eine 4,9 m hohe Versuchswand bei einer zugeführten Wärmeleistung  $\dot{Q}_{\text{Heizung}} = 116W$  das beste Ergebnis erzielt. Für die vorhandenen Kirchenfenster wurde für eine Außentemperatur  $\Theta_{\text{ext}} = -16^{\circ}C$  in erster Näherung ein benötigter Wärmebedarf von  $\dot{Q}_{\text{Heizung}} = 1,17kW$  ( $\dot{Q}_{\text{Fallluft}} = 0,74kW$ ) berechnet. Verbunden mit den 6 Fenstern der Nordwand erhöht sich die zuzuführende Leistung auf  $\dot{Q}_{\text{Heizung} / \text{FensterNordwand}} = 7,04kW$ .

Die Anordnung der Heizflächen ist grundsätzlich nach der Art der Anbringung zu unterscheiden. Hierbei gibt die Abb. 21 einen entsprechenden Überblick dazu. Dabei kann die Heizleistung durch Elektroenergie oder durch Warm-/Heißwasser erzeugt werden. Die Fenstersprossenheizung teilt die benötigte Gesamtleistung in mehrere Teilleistungen auf. Ist diese Anbaufläche nicht geeignet, kann die Gesamtleistung auch zentral mittels Sohlbankkonvektor erzeugt werden.

Das dritte Prinzip (Brüstungskonvektor) nutzt die einfallende Kaltluftströmung und leitet diese nach der Erwärmung in einem Konvektor wieder nach oben. Auch hier sind verschiedene Bauformen möglich. In der rechten Darstellung wird zusätzlich ein Wärmeauslass gezeigt, der sich jedoch nur bei geringem Abstand zwischen Wand und Fenster eignet. In der Klosterkirche kann diese Bauform durch die breiten Mauern keine Anwendung finden.

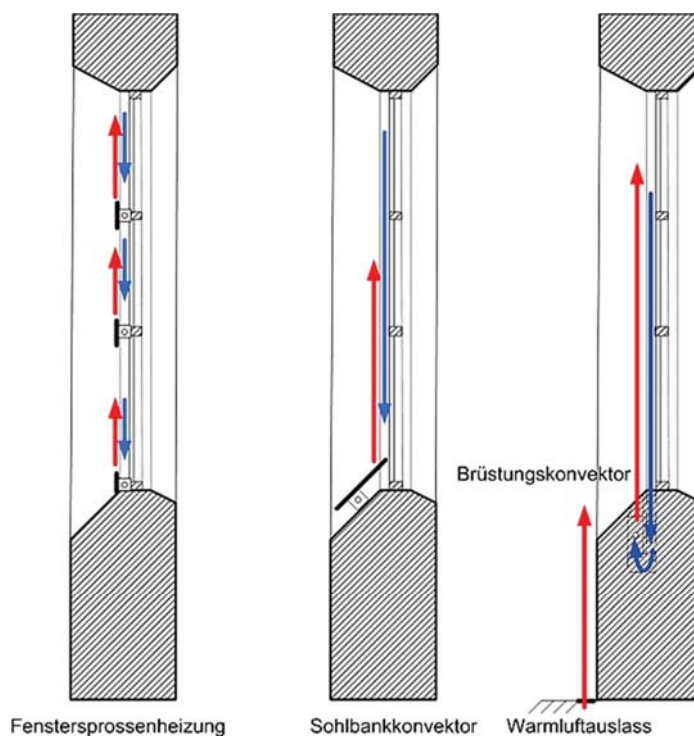


Abb. 21 Variantenübersicht der Heizflächen  
Quelle: In Anlehnung an Ehrhardt, Bernd (03/2011)

Um die Variantenmöglichkeit an dieser Stelle zu vervollständigen, soll eine elektrisch betriebene (Scheiben-) Heizung angeführt werden. Wenn überhaupt, ist dies aber nur bei kleinen Fensterflächen (Maßwerk) realisierbar. Diese beheizbaren Glasflächen sind im Aufbau ähnlich einer Kfz-Scheibenheizung. Hierbei wird ein Heizdraht auf die Glasflächen aufgeklebt. Im späteren

Betrieb verhindert die gleichmäßige Erwärmung der Scheibe den Kaltlufteinfall und ggf. sogar die Eisbildung an der Innenseite der Scheibe. An den großen Fensterflächen in der Klosterkirche kann diese Bauart jedoch keine Anwendung finden. Nachstehend werden in der Tabelle 6 Vor- und Nachteile für Heizflächen an Fenstern aufgeführt.

Tabelle 6 Vor- / Nachteile der Heizflächen

Vorteile	Nachteile
Teilweise geringer Aufwand bei den Versorgungsleitungen als bei Warmluftzufuhr	Hoher Wärmeenergiebedarf bedeutet einen hohen Betriebskostenanteil
	Teilweise erheblicher Eingriff in die vorhandene Struktur
	Benötigt hohe Anschlussleistungen
	Ansicht der Fensterflächen wird durch Konvektoren teilweise zerstört bzw. verändert

### Absaugen der Fallströmung

Die Idee besteht darin, die Fallströmung abzusaugen und damit die Behaglichkeit im Raum zu gewährleisten. Es sei darauf verwiesen, dass im Gegensatz zum Einblasen von Luft (vgl. Wirkung eines Zuluftsystems) mit einem „Abluftsystem“ nicht punktgenau abgesaugt werden kann. Der Absaugung von Luft liegt das Modell einer Kugel bzw. Halbkugel zu Grunde. Für den optimalen Aufbau einer Absaugung müssen Volumenstrom und Dicke der Grenzschicht bekannt sein. Nach [Kriegel, Bernd (1973)] ist die optimale Anordnung der Saugöffnung im Fußboden. Dabei muss die Ansaugöffnung im gleichen Wandabstand, wie die Schichtdicke der nicht umgelenkten Strömung, angebracht werden. Bezogen auf die Klosterkirche ist diese Anordnung schwer realisierbar. Die in 6,7 m Höhe über dem Fußboden angeordnete Fensterbank verlangt eine andere konstruktive Lösung. In Abb. 22 ist die Versuchsanordnung einer Absaugvorrichtung (graues HT-Rohr) am Hussitenfenster zu sehen. Dabei wurde die Saugöffnung durch mehrere ausgefräste Schlitze im Kunststoffrohr realisiert. Mit dem Ziel einer optimalen Anordnung wurde die Absaugvorrichtung in Höhe der Fensterbank positioniert. Der für den Versuch eingesetzte Radiallüfter (Vents VK 100) konnte einen maximalen Volumenstrom von 250 m<sup>3</sup>/h fördern. Anhand von Nebelversuchen vom 28.03.2011 konnte eine Verminderung der Kaltluftströmung im Bereich des Chorgestühls festgestellt und nachgewiesen werden.





Abb. 22 Versuchsanordnung der temporären Absaugeinrichtung am Husitenfenster  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Für den maximalen Schutz müsste die Anlage einen Massenstrom von mindestens  $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{h}$  fördern. Die Tabelle 7 stellt als Gesamtübersicht die einzelnen Vor- und Nachteile gegenüber.

Tabelle 7 Vor- / Nachteile der Absaugeinrichtung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Vorteile	Nachteile
Keinen Heizenergiebedarf	Geräuschpegel
Keine Verschmutzung durch Verwirbelung (Staubpartikel)	Auf- und Anbauten am Fenster bzw. unter der Wand
Indirekte Zwangsbelüftung der Kirche	Abluftrohre müssen nach außen verlegt werden
	Ansichtsflächen der Fenster würden durch Saugkonstruktion verändert werden
	Elektroenergiebedarf

### Absenken der Raumtemperatur

Das Absenken der Raumtemperatur in der Klosterkirche St. Marienstern ist aus einer Empfehlung von [Glück, Bernd (05/2001)] entstanden. Mit Hilfe der Gleichungen (2-1) bis (2.5) wurde Tabelle 8 erstellt und der rechnerische Nachweis erbracht, dass es zu einer Verringerung der Kaltluftströmung kommt. Dies ist mit der Veränderung der Grashof-Zahl zu erklären. Durch das

gewollte Absenken der Raumtemperatur verringert sich der Term der Temperatur (-differenz) in der Grashof-Gleichung. Wichtige Größen wie max. Geschwindigkeit und Massenstrom verringern sich um 7 % bzw. um 6 %. Die Senkung der mittleren Temperatur der Grenzschicht ist durch die allgemeine Temperaturabsenkung zu erklären. Die Verringerung der Raumtemperatur verringert nicht nur die Zugerscheinungen sondern trägt auch zur Einsparung von Heizenergie bei.

Tabelle 8 Gegenüberstellung Raumtemperaturen  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Kennwerte	Raumtemperatur	Raumtemperatur
	t = 15 °C	t = 6 °C
Max. Geschwindigkeit	100 %	93 %
Schichtdicke	100 %	102 %
Mittlere Temperatur der Grenzschicht	100 %	76 %
Massenstrom	100 %	94 %

Da diese Maßnahme schon in der Vergangenheit ergriffen wurde, konnte eine Verringerung der Zuglufterscheinungen durch die Schwestern im Kloster bestätigt werden. Deutlich hervorgehoben muss bei dieser Maßnahme aber werden, dass das Gefühl der thermischen Unbehaglichkeit wesentlich zunimmt – im Chorgestühl und in der Kirche ist es schlichtweg kalt.

## 8.8 Passive Gegenmaßnahmen - Fenster

### Wärmeisolierung der Fenster

Die Wärmedämmung der Fenster stellt sich, wie bereits an mehreren Stellen beschrieben, als wesentliche Einflussgröße auf den Kaltlufteinfall heraus. Der Wärmedurchgangskoeffizient hat einen direkten Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Fenster. Ein geringer Temperaturunterschied zwischen Raum und Fensteroberfläche führt naturgemäß zu kleineren entstehenden Fallluftströmungen. Die Oberflächentemperatur des Fensters lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$T_w = T_\infty - \frac{U}{\alpha_i} (T_\infty - T_a) \quad (2-10)$$

In [Kriegel, Bernd (1973)] wird zur Verdeutlichung ein Einfach- mit einem Doppelglasfenster verglichen. Um diesen Unterschied noch besser hervorzuheben, wurde diese Übersicht neu berechnet und zusätzlich ein Isolierglas mit in die Betrachtung einbezogen.

Tabelle 9 Vergleich der U-Werte  
Quelle: In Anlehnung an Kriegel, Bernd (1973)

<b>Kennwerte</b>	<b>Bleiverglasung</b> <b>U = 5,86 [W/m²K]</b>	<b>Doppelverglasung</b> <b>U = 3 [W/m²K]</b>	<b>Isolierverglasung</b> <b>U = 1,6 [W/m²K]</b>
Max. Geschwindigkeit	100 %	74 %	51 %
Schichtdicke	100 %	107 %	116 %
Mittlere Temperatur der Grenzschicht	100 %	52 %	23 %
Massenstrom	100 %	79 %	59 %

Aus der Tabelle 9 ist eindeutig erkennbar, dass die max. Geschwindigkeit der Fallströmung mit abnehmendem Wärmedurchgangskoeffizienten ebenfalls geringer wird. Der Vorbau eines Isolier- bzw. Schutzglasfensters bietet neben der Verringerung des Kaltluftabfalls einen weiteren Vorteil gegenüber anderen Maßnahmen. Mit der insgesamt verbesserten (Luft-) Dichtheit der Gebäudehülle wird der Energiebedarf der Klosterkirche weiter gesenkt. Dieser Zusammenhang soll mit der Abb. 23 verdeutlicht werden. Hier ist der Monatsverlauf des Wärme-Energiebedarfs für Januar 2011 eingetragen. Demgegenüber steht die eingebrachte Kälte-Energie für ein Bleiglasfenster (grüne Funktion) und ein gedämmtes Fenster (rote Funktion). Gut zu erkennen ist, dass das Bleiglasfenster gegenüber dem gedämmten isolierten Fenster eine höhere Kälteenergiemenge in den Raum einträgt. Die orange Funktion stellt den geringeren (errechneten) Wärmebedarf beim Einsatz von „Isolierglasfenstern“ dar. Das am 06.01.2011 die Kältemenge aus den Nordwandfenstern (grüne Funktion) gegen Null verläuft, hängt damit zusammen, dass an diesem Tag eine höhere Oberflächentemperatur gegenüber der Raumtemperatur vorherrschte (siehe dazu auch Abb. 19). An diesem Tag wurde Wärme von außen in den Raum eingetragen.

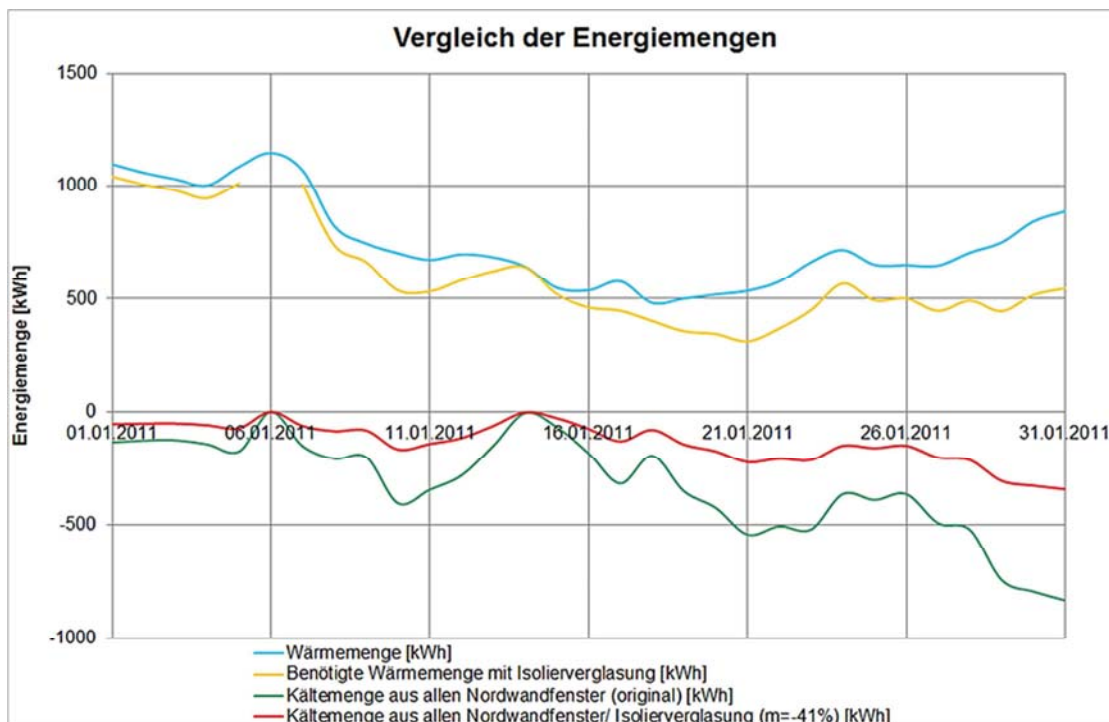


Abb. 23 Vergleich der Energiemengen  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Vorteilhafter Nebeneffekt ist, dass die wertvollen Bleiglasfenster gegen Witterungseinflüsse weitgehend geschützt sind. Die Häufigkeit der schwer realisierbaren Reinigungsarbeiten der Fenster kann reduziert werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass sich die Lebensdauer der Bleiglasfenster erhöht.

Die Gefahr der Tauwasserbildung an den Fenstern wird stark herabgesetzt. Kritisch ist anzumerken, dass durch die (zusätzliche) Vorhang-Scheibe die Außenansicht der Kirche verändert wird. Im Bereich zwischen den Scheiben ist die Reinigung nur bedingt möglich; die Belüftung ist eingeschränkt. Die Gefahr von Feuchtigkeitsproblemen in diesem Bereich steigt. Die bessere Dämmung der Fenster führt zwangsläufig zu bauphysikalischen Veränderungen am Gebäude. Die Erhöhung der Oberflächentemperatur führt naturgemäß zu einer Verlagerung des Kondensationspunktes. Die Abschätzung der Folgen ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Der Vermutung, dass durch die dichtere Gebäudehülle der Kirche ein Be- und Entlüftungskonzept erforderlich ist, wird nicht nachgegangen. Es hat sich während der Aufenthalte in der Kirche gezeigt, dass im Sinn der Lüftungstechnik eine Reihe von Undichtheiten vorhanden ist (Eingangstüren; Tür zum Kreuzgang; Aufgang zur Empore und zum Dachbereich, ...). Besonders nachteilig wirken sich die hohen Einbaukosten aus, die sich aus der Schwierigkeit bzw. Komplexität des Einbaus der Vorhangfenster ergeben. Für eine Realisierung dieser Lösung werden Veränderungen an den vorhandenen Stein- bzw. Rahmenkonstruktionen erforderlich – Probleme aus der Sicht des Denkmalschutzes sind nicht auszuschließen. Die Tabelle 10 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Vor- bzw. Nachteile der Wärmeisolierung wieder.

Tabelle 10 Vor- / Nachteile Wärmeisolierung der Fenster  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
Energieverbrauch wird gesenkt	Kosten
Dichtere Gebäudehülle	Verschmutzung/ Feuchtigkeit zwischen den Glasscheiben
Inventar vor Feuchtigkeit geschützt	Keine Reinigungsmöglichkeit zwischen den Fenstern
Wetterschutz	Außenansicht wird verändert
Gute Reinigungsmöglichkeit der Fenster von außen	Problematischer Einbau im Maßwerkfenster
Schutz der Bleiglasfenster	
Wirksamster Schutz gegenüber Fallströmungen	

### Windschott

Bei einem Windschott können grundsätzlich zwei Arten unterschieden werden. Dabei gibt es eine horizontale und eine vertikale Anordnung (siehe Abb. 24). Die verwendeten Materialien spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle. Kerngedanke ist, der Strömung ein natürliches Hindernis entgegenzustellen.

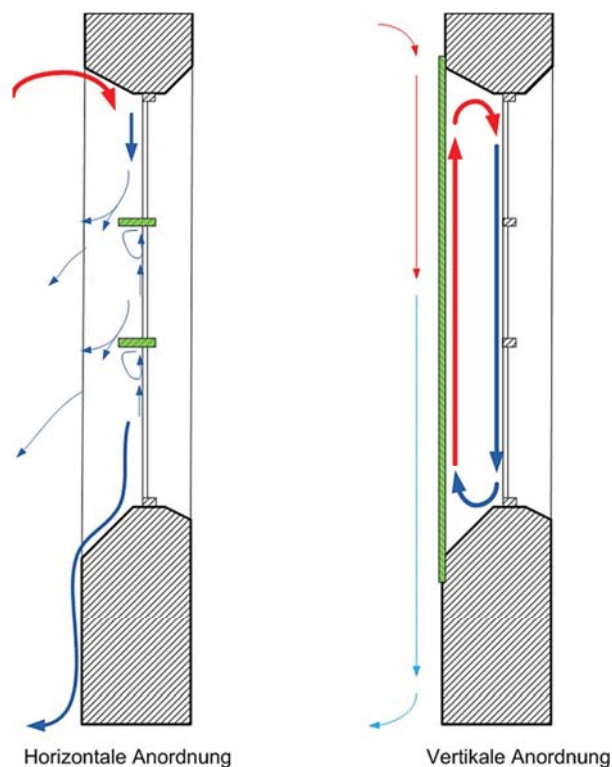


Abb. 24 Windschott – Horizontale/Vertikale Anordnung  
Quelle: In Anlehnung an Krull, Diethelm (2009) sowie Hanel, Bernd (1990)

Bei horizontaler Anordnung [Abweiser nach Kriegel, Bernd (1973)] werden Fallhöhen begrenzt und dadurch die Luftgeschwindigkeit verringert. Entscheidend sind Breite und Tiefe der einzelnen Luftabweiser. Ziel ist, die Fallströmung zu behindern und ein Überströmen zwischen den einzelnen Elementen zu vermeiden. Diese Anordnung kann auf Grund nachteiliger Folgeeffekte (Staubablagerung; Reinigungsaufwand) keine Anwendung finden. Darüber hinaus führt das Tauwasser der Fenster zu Veränderungen in der Optik der Oberflächen. Die verwendeten Materialien unterliegen einem schnellen Alterungsprozess. In der St.-Jakobi-Kirche in Stollberg / Sachsen ist ein horizontaler Windschott in den Kirchenfenstern des Kirchenschiffes eingebaut worden (Abb. 25). Flecken vom Spritzwasser deuten jedoch auch auf die oben genannten Probleme.

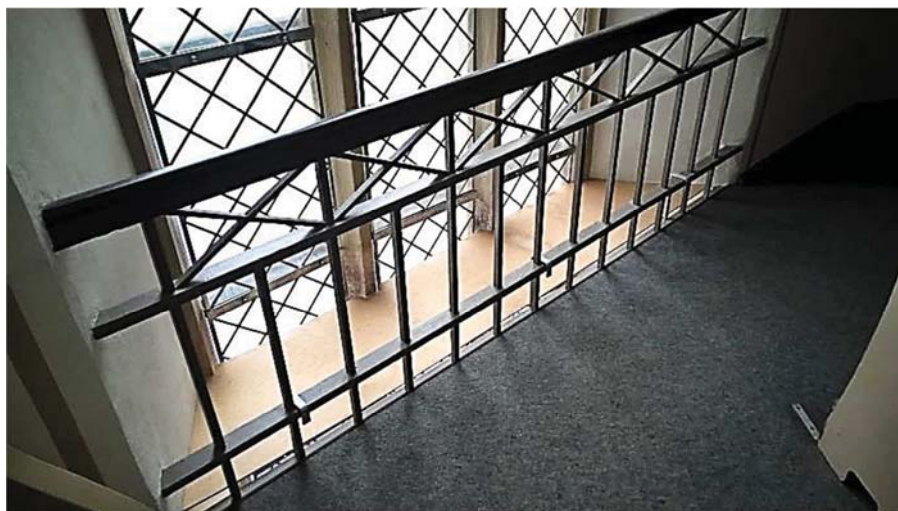


Abb. 25 St.-Jakobi-Kirche in Stollberg / Sachsen mit einem horizontalen Windschott in den Kirchenfenstern des Kirchenschiffes  
Quelle: IDK e.V.

Die vertikale Anordnung nutzt das Prinzip der Strömung im begrenzten Raum. Mit dem Ziel, Nach- bzw. Rückströmung aus dem Kirchenraum zu vermeiden. Dazu wird eine zweite Wand vor dem Fenster angebracht. Die Funktionsweise ist ähnlich dem eines Doppelglasfensters. Luft als schlechter Wärmeleiter stellt unter bestimmten Bedingungen einen guten Dämmstoff dar. Bei geringem Zwischenraum wird die konvektive Strömung weitgehend unterdrückt. Bei größerem Abstand kann es zur Luftbewegung/Luftzirkulation kommen. An der Bleiglasfläche wird es zur Abkühlung kommen, an der Trennwand zur Erwärmung.

In einigen Kirchen gibt es bereits solche historischen vertikale Windschottsysteme, die als Ideengeber für eine „System – Marienstern“ dienten. Oft finden sich solche Windschottsysteme in Dorfkirchen mit Emporeneinbauten, bei denen der untere Fensterbereich zusätzlich innen verglast wurde. In der Tabelle 11 werden vier dieser Kirchen bildlich vorgestellt.

Tabelle 11 bestehende Windschottsysteme in Kirchen  
^  
Quelle: IDK e.V.

	<p>Marienkirche in Crawinkel Thüringen</p> <p>Windschottsysteme unterhalb der seitlicher Emporen im Kirchenschiff</p>
	<p>St. Johannis in Niederzwönitz Sach- sen</p> <p>Windschottsysteme unterhalb der seitlicher Emporen im Kirchenschiff</p>



Marienkirche in Kamenz  
Sachsen

Windschottsysteme oberhalb der  
seitlicher Emporen im Kirchenschiff



St. Laurentius in Pegau  
Sachsen

Windschottsysteme als temporäre  
Einbauvariante an den Fenstern im  
Kirchenschiff

### 8.9 Windschottsysteme für die Klosterkirche St. Marienstern

Innerhalb des Vorprojektes 2007 / 2008 konnte durch messtechnische Untersuchungen der Kaltluftabfall an den Fenstern der Nordfassade als Hauptursache für die Zugserscheinungen herausgearbeitet werden. Unterhalb dieser Fenster wurden Spitzengeschwindigkeiten von über 0,4 m/s gemessen. Zum Vergleich: Schon Luftgeschwindigkeiten von unter 0,1 m/s werden vom Menschen als unangenehme Zugserscheinungen wahrgenommen. Neben der Entwicklung eines der Nutzung und dem Nutzerverhalten angepassten Heizungssystems mit angepasster Temperaturregelung, konnten in diesem Forschungsprojekt auch Empfehlungen zum Umgang mit den Maßwerkfenstern gegeben werden. So wurden erste Überlegungen für ein innen liegendes System zur Verhinderung der Kaltluftabfälle erarbeitet. Im hier vorgestellten Forschungsprojekt wurden die Lösungsansätze für die Umgestaltung des Heizsystems zwecks Verbesserung der thermischen Behaglichkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Belastung der raumseitigen Bauteiloberflächen weiterentwickelt, umgesetzt und messtechnisch untersucht.



Einen Schwerpunkt bildete eine Kombination von Maßnahmen zur Senkung von Diskomforterscheinungen infolge der Fallluftströmungen an den Nordfenstern:

- Reduzierung der Wirkung der Fenster als Abkühlfläche für die Raumluft,
- Absenkung der winterlichen Grundtemperatur in der Kirche von 12 °C auf 8 °C,
- möglichst gleichmäßige Verteilung von Heizflächen mit geringer Oberflächentemperatur im Kirchenraum zwecks Minimierung von lokalen Bereichen mit nennenswerten thermischen Auftrieb,
- Einbau eines neuen Chorgestühls welches die Nonnen gegen Raumluftrömungen abschirmt.

Um die Wirkung der Fenster als Abkühlfläche für die Raumluft zu senken wurde folgendes Konzept entwickelt: Durch eine raumseitig mit Abstand vor dem Fenster liegende Verkleidung wird verhindert, dass Raumluft auf die kalte Verglasung trifft, an dieser abkühlt und als Fallluftstrom die Behaglichkeit im Kirchenraum beeinträchtigt. Die Verkleidung wird so angebracht, dass sie an der raumseitigen Wandoberfläche möglichst dicht anliegt; der Luftzwischenraum soll möglichst nicht strömungstechnisch mit dem Kirchenraum in Verbindung stehen. Bei extrem niedrigen Außenlufttemperaturen besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Luftraum zwischen Fenster und raumseitiger Verkleidung durch elektrische Heizsysteme zu temperieren (Abb. 27).

Für die Realisierung der Verkleidung wurden zwei Varianten erarbeitet und messtechnisch untersucht (Abb. 26):

- Glasfläche (im beschriebenen Forschungsprojekt aus Plexiglas),
- temporär einsetzbare Stoffbahnen



Abb. 26 Installierte Windschottsysteme zur messtechnischen Beprobung  
links: Stoffvariante, rechts: Plexiglasvariante  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

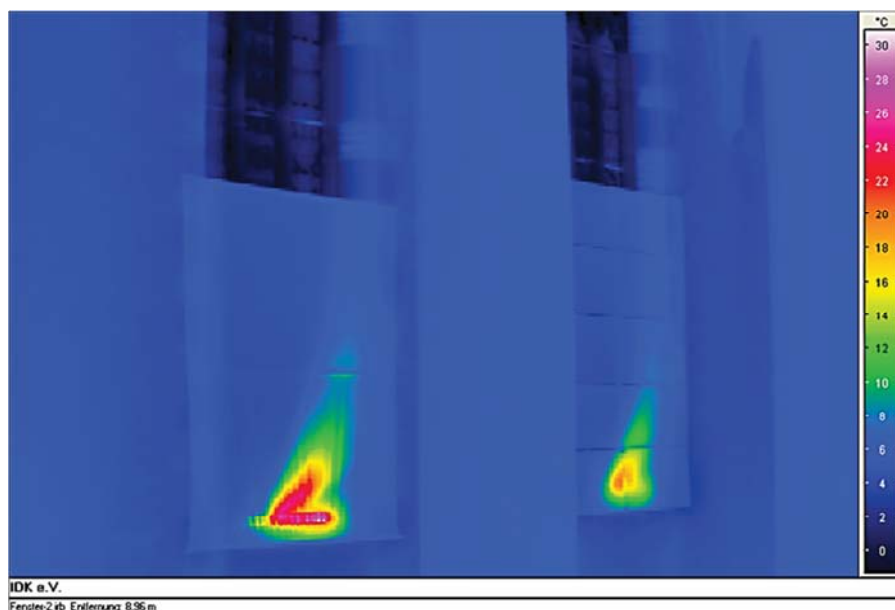


Abb. 27 temporäre Windschottsysteme mit eingeschalteten elektrischen Heizkörpern  
links: Stoffvariante, rechts: Plexiglasvariante  
Quelle: IDK e.V.

Die erfolgten Messungen (Klima- und Nahfeldklimamessungen, Strömungsuntersuchungen zur Visualisierung der Luftbewegungen) erbrachten, dass beide Systeme einen ausreichenden Schutz gegen Kaltluftabfälle aufweisen. Abb. 28 verdeutlicht am Beispiel der Stoffbahnen, dass auch ohne Einsatz der elektrischen Temperierung des Luftzwischenraumes sowohl Häufigkeit als auch Intensität der Fallluftströmung deutlich reduziert werden konnten.

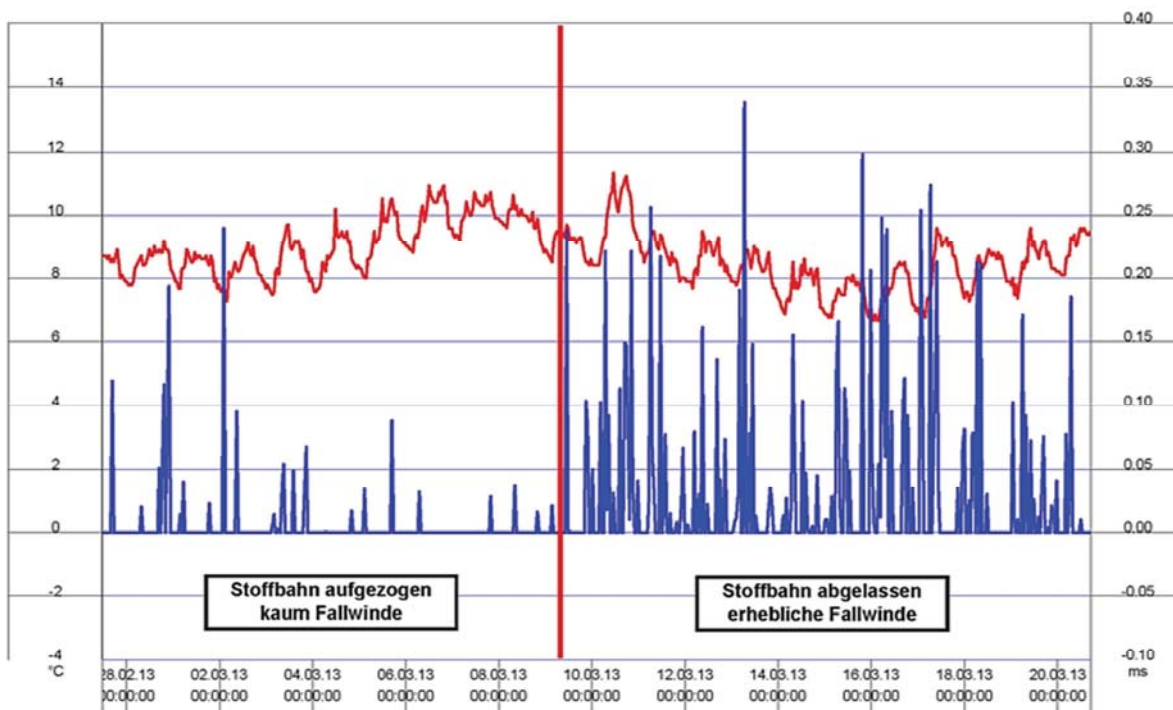


Abb. 28 Messdaten der Fallwinde mit aufgezogener und abgelassener Stoffbahn am Musterfenster  
Quelle: IDK e.V.

Die optisch ansprechende Lösung für die Glasflächen wäre u. a. aufgrund des Einsatzes sehr kleinteiliger Eckbefestigungen, Verwendung von Sicherheitsglas und der Entspiegelung, mit etwa um den Faktor 10 höheren Kosten als die Variante Stoffbahnen verbunden gewesen. Zudem hätte sich die Reinigung schwierig gestaltet. Daher entschied man sich für die Stoffbahnen als endgültig umzusetzende Variante (Abb. 29). Diese bestehen aus einem größtmöglich transparenten Spezialstoff, wie er auch für Sonnenschutzrollos zum Einsatz kommt. Die Bahnen sind an einem filigranen Seilzugsystem befestigt, welches es ermöglicht, dass die Stoffbahnen mit wenigen Handgriffen zu Beginn der kalten Jahreszeit (ca. Oktober) angebracht und im Frühjahr (vor Ostern) zur Reinigung wieder abgenommen werden können. In Abb. 31 wird das Konstruktionsschema und die Funktionsweise der Stoffwindschotte in der Klosterkirche dargestellt. Es handelt sich um ein kleinteiliges Seilzugsystem, welches durch das Eigengewicht der Stoffbahn herabgelassen werden kann. Durch diese sehr filigrane Ausführung fallen die im Sommer an der Wand verbleibenden Seilelemente nicht sonderlich auf. Für die Montage werden max. zwei Personen benötigt. Die zusammengerollten Stoffbahnen werden staubgeschützt in einem trockenen Raum des Klosters gelagert.



Abb. 29 aufgezogene Stoffwindschotte an den nördlichen Maßwerkfenstern der Klosterkirche  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 30 aufgezogene Stoffwindschotte an den nördlichen Maßwerkfenstern der Klosterkirche  
Quelle: IDK e.V.

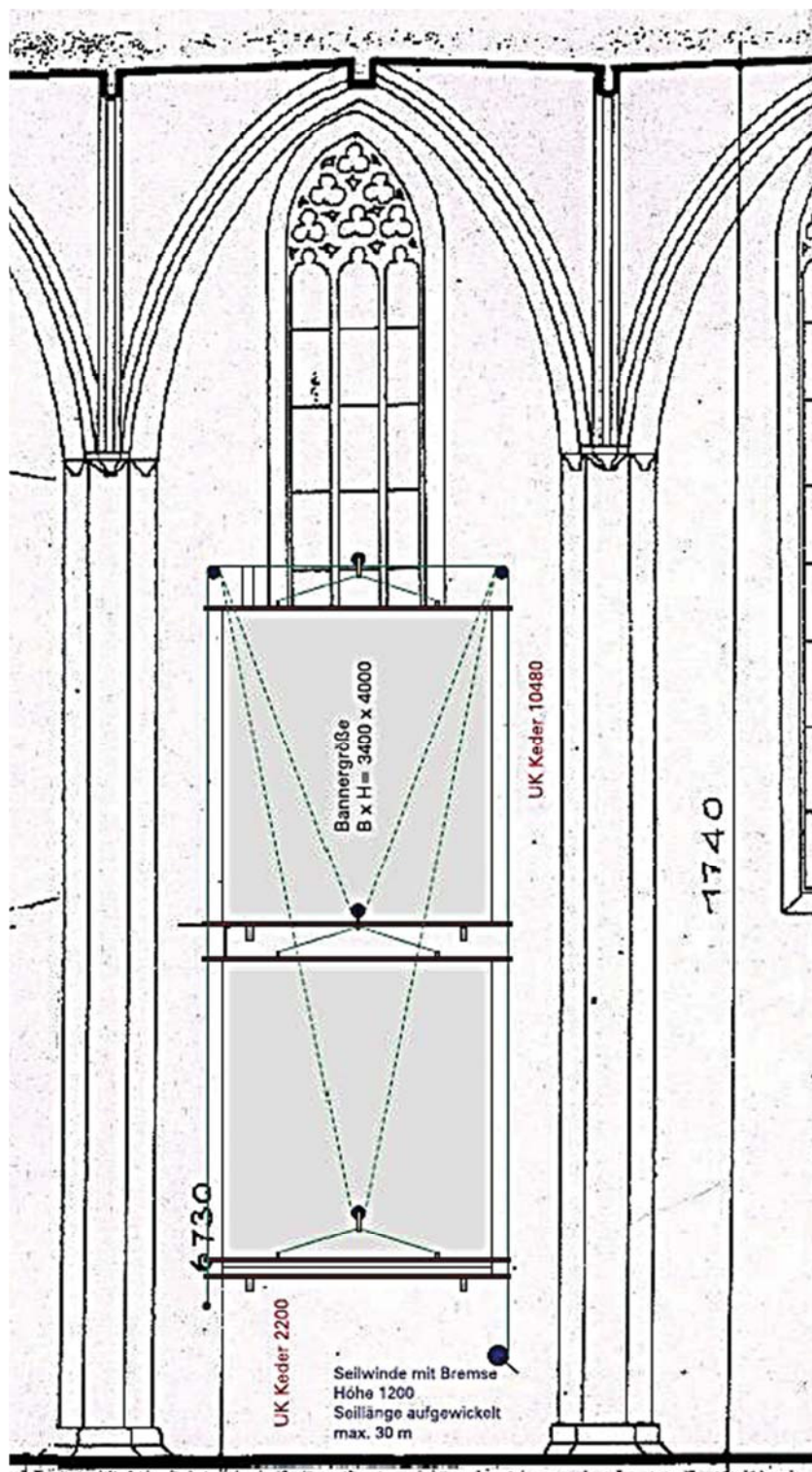


Abb. 31 Konstruktionsschema und Funktionsweise der Stoffwindschotte  
Quelle: IDK e.V.

Genauere Untersuchungen über die prinzipiell benötigte Höhe, den ein- und ausfließenden Massenstrom, die Strömungsgeschwindigkeit sowie eine Strömungsuntersuchung im teilverschlossenen Raum konnte aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Orientiert an den Ansätzen der Strömungsmechanik würde eine komplett abgeschlossene Fläche das beste Ergebnis erzielen. Wichtig ist dabei außerdem die Dichtheit zum Innenraum. Es gilt, je besser die Trennfläche ab-

schließt und je dichter das Material ist, desto bessere Ergebnisse können erzielt werden. Im Versuchsaufbau waren die Undichtigkeiten und die damit verbundene Abkühlung der Innenwände im linken Teil der Abb. 32 deutlich zu erkennen.

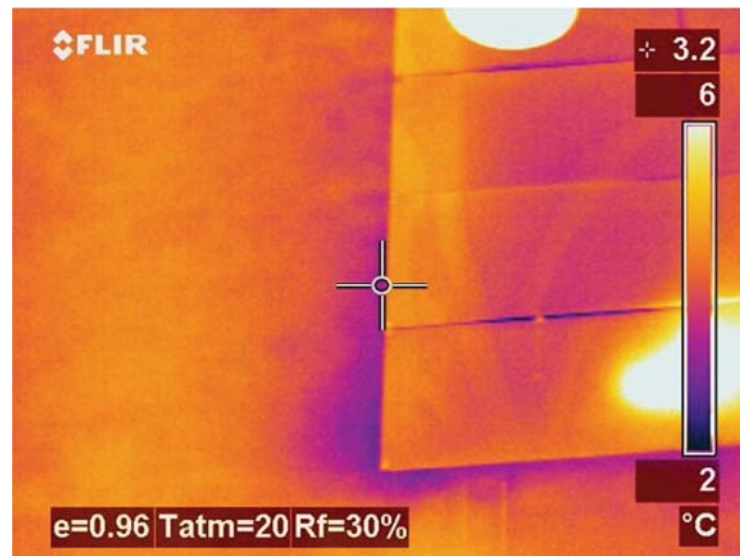


Abb. 32 Abkühlung durch Undichtigkeit der Schutzmaßnahme  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Zusammenfassend muss gesagt werden, dass es mit der derzeitigen Versuchsanordnung zu keiner Verringerung des Wärmeverlustes durch die Fenster kommt. Dessen ungeachtet wird der Impuls bzw. die Geschwindigkeit der Strömung - die in den Raum fließt - durch einen Strömungswiderstand verringert. Vorteile für die Stoffbahnen liegen in geringeren Kosten, einfacherer Montage, besseren Reinigungsmöglichkeiten und einer hohen Lebensdauer. Plexiglas bildet dagegen einen strömungsdichteren Raum und ist somit, energetisch gesehen, vorteilhafter. Insgesamt können dem Windschott die Vor- bzw. Nachteile aus der Tabelle 12 zugeordnet werden.

Tabelle 12 Vor- / Nachteile Windschott  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Vorteile	Nachteile
Einfache, schnelle Installationsmöglichkeit	Veränderte Ansichts- und Lichtverhältnisse in der Klosterkirche
Bei vollständiger Abdeckung der Fensterfläche Isolationswirkung	Je nach Material kurze Lebensdauer
Spürbare Verringerung von Zuglufterscheinungen unterhalb von Fenstern	Schwierige Reinigung
	Kosten

### 8.10 Verknüpfung der Maßnahmen

Eine Kombination aktiver und passiver Maßnahmen ist möglich; die Wirksamkeit wird weiter erhöht. Ein Überblick wird in Tabelle 13 gegeben. Dabei stellt eine Kombination aus Raumtemperaturabsenkung und einer Wärmedämmung (Isolierverglasung) die beste Lösungsmöglichkeit dar. Zu erkennen ist, dass dabei die Luftgeschwindigkeit um 55 % und der Massenstrom um 46 % gegenüber dem Ausgangszustand (Bleiglas) reduziert werden kann. Der Nachteil der hohen Einbaukosten lässt sich durch die gesunkenen Energiekosten amortisieren. Die Varianten der Fensterisolierung und unter bestimmten Umständen das Windschott sind die einzigen, die sich amortisieren lassen.

Tabelle 13 Überblick über RT-Absenkung und Isolierung der Fenster  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Kennwerte	Bleiverglasung	Bleiverglasung	Isolierverglasung
	Raumtemperatur t = 15 °C	Raumtemperatur t = 6 °C	Raumtemperatur t = 6 °C
Max. Geschwindigkeit	100 %	89 %	45 %
Schichtdicke	100 %	103 %	119 %
Mittlere Temperatur der Grenzschicht	100 %	76 %	17 %
Massenstrom	100 %	92 %	54 %

Es stellt sich jedoch heraus, dass Dämm-Maßnahmen nur an der Ost- bzw. Südwand möglich sind, da in diesem Bereich die Ansicht der Klosterkirche nur gering verändert wird bzw. die Fenster durch den Innenhof nicht einsehbar sind. Für das eigentliche Problem der Kaltluftströmung erbringt die Dämmung der Südfenster nur geringe bis keine Veränderung, da der Kreuzgang bzw. die Chorgasse diesen Bereich vom eigentlichen Kirchenraum abtrennt. Für die Ostseite wäre diese Maßnahme durchführbar.

Eine weitere Kombinationsmöglichkeit bietet sich vor allem für das Hussitenfenster durch eine Kombination von Windschott mit Absaugung an. Der Altar verdeckt bei geschickter Rohrführung einen Großteil der Leitungen. Das optische Problem im Inneren der Klosterkirche minimiert sich dadurch von selbst. Der anfallende kalte Luftmassenstrom kann durch eine Kernlochbohrung aus der Klosterkirche in den angrenzenden, nicht mehr verwendeten Heizungsraum, geblasen/gesaugt werden. Diese Verbindung schafft zugleich eine Zwangsbelüftung des Kirchenraums. Eine Abstufung zwischen Volllastbetrieb (über Nacht) und Teillastbetrieb (während des Gottesdienstes) verringert die akustischen Störeeigenschaften der Anlage. Die Drehzahl des Ventilators kann mittels Regelung über die Oberflächentemperatur des Fensters gesteuert werden.

Die dritte Möglichkeit ist in der Abb. 33 zu erkennen. Hierbei nimmt der Windfang im unteren Bereich die Kaltluft auf und leitet diese an den Absaugstutzen weiter. Um den Bereich vor

Feuchtigkeitsschäden zu schützen, wird durch das Öffnen der Lüftungsklappe (oben) ein Ansaugen aus dem Außenbereich (durch die undichte Verglasung) minimiert.

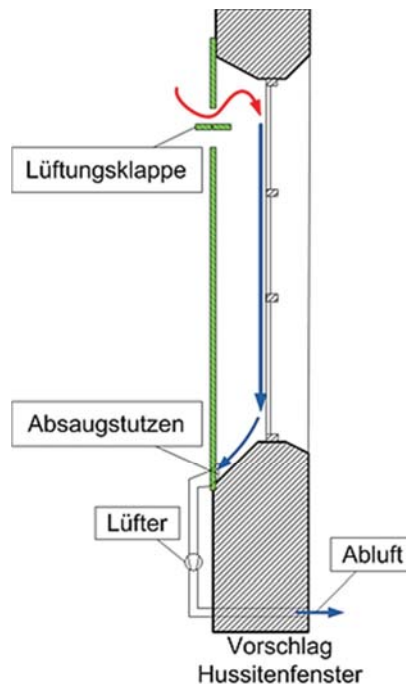


Abb. 33 Kombination aus Ablufteinrichtung und Windschott  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### 8.11 Zusammenfassung Raumluftrömung

Zusammenfassend gilt zu sagen, dass in Bezug auf den Kaltluftabfall sowie der Energieeinsparung eine vollständige Schutzverglasung für die Klosterkirche den größten Nutzen darstellen würde. Jedoch ist aus wirtschaftlichen sowie aus Gründen des Denkmalschutzes diese Lösung nicht realisierbar.

Ratsam war es deshalb nur eine Veränderung der Fensterflächen durchzuführen, die anordnungsbedingt den größten Einfluss auf die Zuglufterscheinung in der Kirche haben. Für die Nordwand stellt sich das vertikale Windschott als beste Lösungsmöglichkeit heraus. Die Ansichtsfläche von außen ist nicht beeinträchtigt. Bei einer kompletten Fensterverblendung hätte neben der Verminderung der Kaltluftströmung ebenfalls eine Energieeinsparung erwartet werden können.

Für das Hussitenfenster an der Ostseite ist eine genauere Untersuchung erforderlich, da sich das vorgebaute Bleiglasfenster im Aufbau zu anderen Fenstern unterscheidet. Gleichzeitig wurde an diesem Fenster die größte Kaltluftströmung unterhalb der Fensterfläche festgestellt. Durch den begrenzten Raum kann die Schichtdicke nur begrenzt anwachsen, die Luftgeschwindigkeit erhöht sich demzufolge mit zunehmender Lauflänge. Durch diese Besonderheit werden Strömungsverhältnisse hervorgerufen, welche sich mit den gegebenen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten nicht vergleichen lassen. Weiterhin ist die Fragestellung interessant, warum die Strömung nicht abreißt? Da beide Fensterflächen im oberen Raum verschlossen sind, dürfte keine weitere Kaltluft entstehen. Der aktuelle Zustand beweist somit Undichtigkeiten im oberen Bereich der Bleiglasfenster. An dieser Stelle erscheint es sinnvoll, unter Einbeziehung aller Entscheidungsträger über eine komplett neue Schutzverglasung von außen nachzu-

denken. Ebenfalls sinnvoll erscheint eine weitere passive Maßnahme – der Verschluss der Blei-  
glasfenster an den Abschlusskanten, ggf. auch in Kombination mit einer Absaugeinrichtung. Für  
den Nachweis der Wirksamkeit müsste in der Folge eine genauere Untersuchung durchgeführt  
werden. Es besteht zumindest theoretisch die Gefahr, dass eine unterbrochene Hinterlüftung  
Schäden am Fenster verursachen kann.

Abschließend sei auf das zugesetzte Fenster über der Orgel hingewiesen. Die Wand ist an die-  
ser Stelle sehr dünn. Signifikant niedrigere Wand-Oberflächentemperaturen können auch hier  
zu Kaltlufterscheinungen führen, die sich nachteilig auf die Orgel auswirken. Auch an dieser  
Stelle bleibt zu prüfen, ob eine Dämmung dieser Fläche vorteilhaft für die Kirche ist.

## 9 Das neue Chorgestühl

Das Heizsystem in der Klosterkirche wurde als Hauptverursacher der Verschmutzungsprobleme  
an Wänden und Decken in der Klosterkirche lokalisiert. Abhilfe schaffte eine Verringerung und  
Neugruppierung der Anzahl der Heizkörper und deren technischer Anordnung und eine Absen-  
kung der Raumtemperatur auf 8°C in der Heizperiode. Verbunden damit veränderte sich natür-  
lich auch das Behaglichkeitsempfinden der Besucher, besonders aber auch jenes der täglich  
anwesenden Nonnen des Klosters. Durch den Einbau einer Bankheizung in den Besucherrei-  
hen konnte die thermische Behaglichkeit im Bereich der Bankreihen verbessert werden.

Damit nicht behoben sind die negativen Veränderungen im Bereich des Chorgestühls. Verände-  
rungen am Chorgestühl sowie Umbaumaßnahmen an den Kirchenfenstern sollen zur Behag-  
lichkeitssteigerung im Bereich der betenden Schwestern führen. Wichtig ist, neben den techni-  
schen Möglichkeiten auch den örtlichen Denkmalschutz sowie klosterinterne Vorgaben zu be-  
achten.

### 9.1 Grundlagen

Den Veränderungen am Chorgestühl werden Aussagen zur thermischen Behaglichkeit voran-  
gestellt.

Der menschliche Körper hat das Bestreben, die sog. Körperkerntemperatur von 37 °C ± 0,2 °C  
konstant zu halten. Durch Muskelbewegungen sowie durch Stoffwechsellätigkeiten wird Wärme  
produziert. Um einen Gleichgewichtszustand zu halten, muss unter bestimmten Bedingungen  
diese Wärme wieder abgeführt werden. Der menschliche Körper steht hauptsächlich durch fünf  
physikalische Phänomene mit seiner Umgebung in thermischer Wechselbeziehung. Die Wär-  
meabgabe bzw. -aufnahme erfolgt in Abhängigkeit der konkreten Situation durch:

- Konvektion (Körperoberfläche gibt Wärme an die umgebende Luft ab bzw. nimmt diese auf)
- Wärmeleitung (Wärmeabgabe bzw. -aufnahme über direkt berührte Flächen)
- Wärmestrahlung (Körperoberfläche gibt Wärme an die Umgebung ab bzw. nimmt Wärme auf)
- Verdunstung (Wärmeabgabe durch Verdunsten von Wasser; Wärmeabgabe an die umgebende Luft; Schwitzen)
- Atmung (anteilig bestehend aus Wärmeabgabe an die Atemluft – Konvektion – und Veränderung der absoluten Feuchte der Atemluft – Verdunstung)



Der Wärmehaushalt eines Körpers wird maßgeblich durch Kälte- und Wärmerezeptoren gesteuert. Diese reagieren bei Über- bzw. Unterschreitung von Schwellentemperaturen. Die auf/in der Haut befindlichen Kälterezeptoren bewirken eine deutliche Richtungsempfindlichkeit z.B. gegenüber kalter Zugluft und kalten Wandflächen.

Thermische Behaglichkeit wird in der DIN EN ISO 7730 wie folgt definiert: „Thermische Behaglichkeit ist das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt“ Es ist dementsprechend der Bereich, in dem sich ein Mensch thermisch neutral fühlt.

## 9.2 Physikalische Bedingungen

Die thermische Behaglichkeit wird maßgeblich von einem Zusammenspiel der Lufttemperatur mit der Temperatur der Umschließungsfläche (Mittlere Strahlungstemperatur) sowie mit der relativen Luftfeuchte und der Bewegung der Raumluft beeinflusst. In der Literatur wird neben der Anströmrichtung noch die betroffene Körperpartie genannt. Sekundäre Faktoren, wie Luftdruck, Luftzusammensetzung, Luftelektrizität, akustische Einflüsse und optische Einflüsse werden an dieser Stelle nicht betrachtet, da diese im Rahmen der Untersuchungen nicht zu beeinflussen waren.

### Lufttemperatur

Die in der Aufenthaltszone gemessene Lufttemperatur hat einen großen Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden eines Menschen, da die Temperatur entscheidend für den Wärmeaustausch zwischen Mensch und Umwelt ist. Neben einer behaglichen Lufttemperatur ist ebenfalls eine geringe vertikale Temperaturschichtung zwischen Fuß- und Kopfbereich wichtig. Die nachstehende Abb. 34 stellt den Prozentsatz an unzufriedenen Personen aufgrund vertikaler Lufttemperaturunterschiede zwischen Kopf und Füße dar.

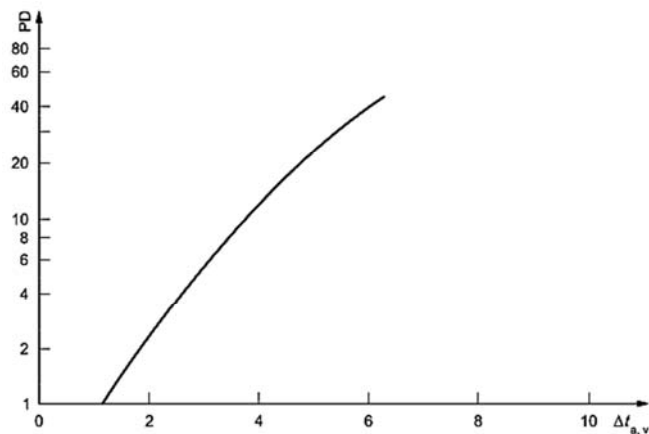


Abb. 34 Unbehaglichkeit durch Lufttemperaturunterschiede  
Quelle: DIN EN ISO 7730 (2006)

In DIN 13779 wird ein Temperaturgradient von höchstens 2 K je Meter Raumhöhe empfohlen. Ebenfalls soll die Lufttemperatur in 0,1 m Höhe über dem Fußboden 21 °C nicht unterschreiten. Daraus resultieren besondere Anordnungen an die Anordnung der wärmeabgebenden Flächen im Raum. Eine exakte und richtige Raumtemperatur lässt sich nur schwer benennen. Diese wird von weiteren Parametern beeinflusst.

## Temperatur der Umschließungsfläche

Die Temperatur der Umschließungsfläche ist wichtig bei der Betrachtung der Raumtemperatur (operative Temperatur, Empfindungstemperatur), da sie letztendlich eine Kombination aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur darstellt. Diese Betrachtungsweise ist wichtig, da der Mensch den Unterschied zwischen der temperierten Luft und der Strahlungswärme bzw. -entzug nicht unterscheiden kann. Nicht zu vergessen ist, dass zwischen dem menschliche Körper und seiner Umwelt ein ständiger Prozess der Strahlungswärmeübertragung abläuft.

Im Zusammenspiel zwischen der mittleren Strahlungstemperatur und der mittleren Wandflächentemperatur kommt es zu der Bezeichnung der operativen bzw. der empfundenen Raumtemperatur (siehe oben). Diese stellt einen Mittelwert aus der Lufttemperatur des Raumes und einer Durchschnittstemperatur der Umschließungsfläche(n) dar. Eine Umschließungsfläche ist die Fläche von der ein Mensch, der sich im Raum befindet Strahlung empfängt oder abgibt. Die operative Temperatur kann wie folgt berechnet werden:

$$t_o = \frac{\alpha_K \cdot t_L + \alpha_S \cdot t_U}{\alpha_K + \alpha_S} \quad (1-1)$$

Ohne den Einfluss der Raumlufgeschwindigkeiten  $\alpha_K = \alpha_S$  wird angenommen. Daraus ergibt sich:

$$t_o = \frac{t_L + t_U}{2} \quad (1-2)$$

Diese Gleichung gilt nur bei geringer Aktivität, normaler Bekleidung, üblicher Lufttemperatur sowie relativer Luftfeuchte. Als Grenzwert wird zwischen der Raumlufgeschwindigkeit und der Oberflächentemperatur 1,5-3 K festgelegt. Die Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur wird in [Raiß, Wilhelm (1960)] näher erläutert. Berechnet wird die mittlere Oberflächentemperatur im Allgemeinen wie folgt:

$$t_U = \frac{F_1 \cdot t_1 + F_2 \cdot t_2 + \dots + F_n \cdot t_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \quad (1-3)$$

Aufgrund dieser Komplexität wurde in der Vergangenheit durch mehrere Wissenschaftler versucht, Behaglichkeitsfelder zu erstellen. Exemplarisch ist dies in [Raiß, Wilhelm (1960)]. zu finden. Es ist zu bemerken, dass die ausgewiesenen Bereiche auf empirischem Weg aufgestellt wurden. Für alle Felder gilt jedoch eine relative Luftfeuchte (30-70%), ruhende Luft, entspanntes Sitzen, typische Bekleidung für Innenräume und eine gleichmäßige Oberflächentemperatur (keine Decken-, Wand-, Fußbodenheizung).

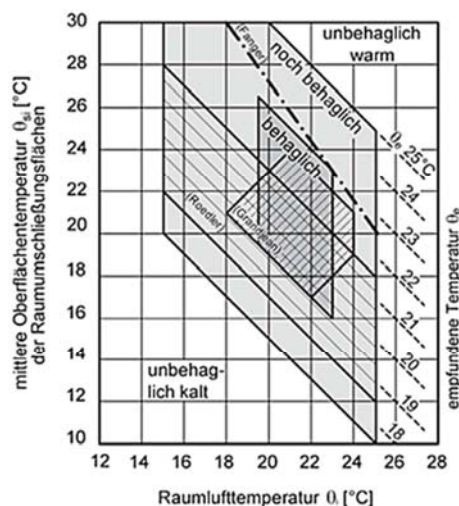


Abb. 35 Behaglichkeitsfelder – Oberflächentemperatur  
Quelle: Willems, Wolfgang M. (2006)

Bei Betrachtung von Flächenheizungen (Wand-, Decken und Fußbodenheizung) müssen weitere/andere Behaglichkeitsbedingungen untersucht werden. Denn speziell bei einer Fußbodenheizung kommt es zu einem direkten oder indirekten Kontakt zwischen der Heizfläche und den Füßen. Die Temperatur der Fußbodenoberfläche muss begrenzt werden. Zum einen soll die max. zulässige Oberflächentemperatur nach der DIN EN 1264 in der Aufenthaltszone 29°C und in der Randzone 35°C betragen, um gesundheitliche Risiken zu reduzieren. Zum anderen soll diese minimal 16-17°C betragen, da eine niedrigere Temperatur zu viel Wärme vom Fuß ableitet. Dieser Wärmeentzug ist abhängig vom Wärmedurchlasswiderstand und somit auch abhängig vom Material.

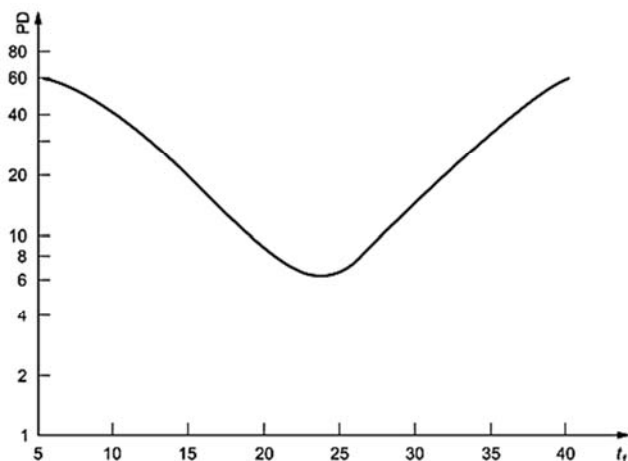


Abb. 36 Unzufriedene[%] – Fußbodentemperatur  
Quelle: DIN EN ISO 7730 (2006)

Vorige Abb. 36 zeigt die Anzahl der unzufriedenen Personen[%] in Abhängigkeit zur Fußbodentemperatur. Es ist festzustellen, dass bei operativen Temperaturen um 20 °C für die minimalen bzw. maximalen FB-Temperaturen jeweils 10 % der Personen unzufrieden sind. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass selbst bei einer idealen Temperatur von 24 °C immerhin noch 6 % der Personen unzufrieden sind. Eine 100 %-Zufriedenheit kann bei keiner Temperatur gefunden werden.

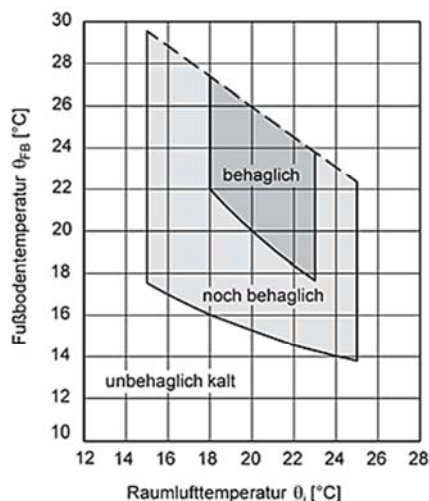


Abb. 37 Behaglichkeitsfeld – Fußbodentemperatur  
Quelle: Willems, Wolfgang M. (2006)

Die vorige Abb. 37 stellt das Behaglichkeitsfeld in Abhängigkeit von der Fußbodentemperatur zur Raumtemperatur dar. Wichtig ist, dass beide vorangegangene Abbildungen für elektrisch beheizte Fußböden und längerem Aufenthalt nicht gültig sind. In einer Anmerkung in [Krull, Diethelm (2009)] ist dazu folgendes zu lesen: „Bei elektrischer Heizung ist ein Anteil der zugeführten Wärme unabhängig von der Oberflächentemperatur. Ein auf Wasser basierendes Heizsystem erreicht keine höheren Temperaturen als die Temperatur des Wassers.“

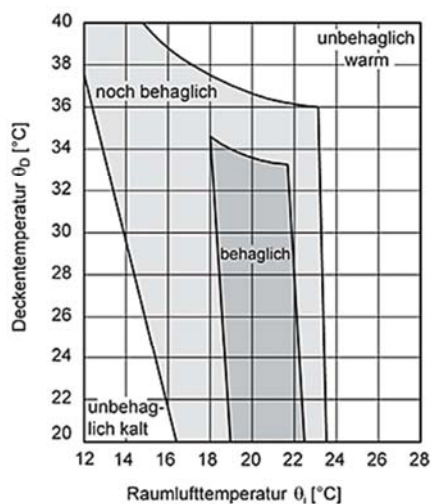


Abb. 38 Behaglichkeitsfeld – Deckentemperatur  
Quelle: Willems, Wolfgang M. (2006)

Obige Abb. 38 zeigt das entstehende Behaglichkeitsfeld bei einer Deckenheizung (Raumhöhe 3,40 m). Hierbei ist zu erkennen, dass sich bei Deckentemperaturen bis 35 °C Behaglichkeit einstellt. Es ist anzunehmen, dass bei einer Verringerung der Höhe, sich das Feld deutlich verkleinert.

Wie eingangs schon bei der Fußbodenheizung erwähnt, entziehen kalte Flächen dem menschlichen Körper bei einem direkten sowie bei einem indirekten Kontakt Wärme. Kommt es zu einer

Berührung zwischen dem menschlichen Körper und einer anders temperierten Oberfläche, wird dies als Kontakttemperatur bezeichnet. Diese Temperatur stellt sich zwischen beiden Körpern ein und ist abhängig von der Wärmeeindringzahl. Die Wärmeeindringzahl kann mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c} \quad (1-4)$$

$b_{\text{Haut}}$  liegt zwischen 1...1,3 kJ/(m<sup>2</sup> K s<sup>0,5</sup>)

In Verbindung mit der Wärmeeindringzahl kann die Kontakttemperatur wie folgt berechnet werden:

$$\vartheta_K = \frac{\vartheta_1 \cdot b_1 + \vartheta_2 \cdot b_2}{b_1 + b_2} \quad (1-5)$$

In folgender Tabelle 14 werden beispielhaft die Kontakttemperaturen zwischen einer Handoberflächentemperatur von 33 °C,  $b_{\text{Haut}} = 1,0$  kJ/(m<sup>2</sup> K s<sup>0,5</sup>) und einer Oberflächentemperatur von -20 °C dargestellt. Beim Betrachten der einzelnen Temperaturen ist festzustellen, dass insbesondere die schlechten Wärmeleiter eine hohe Kontakttemperatur bei einer geringen Umgebungstemperatur zulassen. In Bezug auf die Klosterkirche kann daher als gewünschtes Baumaterial nur Holz für das Chorgestühl nur empfohlen werden.

Tabelle 14 Kontakttemperaturen  
Quelle: Großmann, Holger (2010)

Material	Oberflächentemperatur 20 [°C] Kontakttemperatur [°C]
Kupfer	-19
Baumwolle	23
Kork	23
Styropor	28

Die Kontakttemperatur ist nicht zu verwechseln mit der Oberflächentemperatur. Für die Behaglichkeit ist nicht das Material des Fußbodens, sondern die Fußboden(oberflächen)temperatur entscheidend.

#### Strahlungstemperaturasymmetrie

Unter einer Strahlungsymmetrie werden zwei oder mehrere unterschiedlich temperierte Bereiche in einem Raum verstanden. Das können zum Beispiel eine kalte Wand-, Fensterfläche und eine warme Zimmerdecke sein. Somit ist ebenso die räumliche Lage der Flächen zum Körper bedeutend. Da die Körperbereiche unterschiedlich auf gewisse Klimazonen reagieren, werden diese in der Literatur extra unterteilt.

Da schon geringe Übertemperaturen der Decke durch die Kopfhaut spürbar sind wird hierbei die Deckenheizung als empfindlichster Bereich genannt. Dabei muss die Mindestwärmeabgabe des Kopfes berücksichtigt werden, andernfalls führt es schnell zu Unbehagen in dieser Zone. Weiterhin ist der Abstand von der Deckenheizung zum Kopf entscheidend (Abstandsgesetz). [Raiß, Wilhelm (1960)]

Zu beachten ist, dass sich bei einer Deckenheizung gleichzeitig die Oberflächentemperatur des Fußbodens sowie die Temperatur der Innenwandflächen erhöht. Demzufolge verringert sich der Strahlungsanteil den der menschliche Körper abgibt und der konvektive Teil muss dadurch steigen. Da der Gesamtanteil sich jedoch wieder ausgleicht und der Körper bekleidet ist, kann hieraus keine Abnahme der Behaglichkeit begründet werden. [Raiß, Wilhelm (1960)]

Die zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrie auf der Grundlage der VDI 3804 beträgt:

Maximale Deckentemperatur 35 °C

Minimale Wandtemperatur 18 °C

Maximale Wandtemperatur 35 °C

Maximale Fußbodentemperatur 29 °C

Die in folgender Abb. 39 dargestellten Kurven stehen für warme Decke (1), kühle Wand (2), kühle Decke (3), warme Wand (4). Diese drücken die Unzufriedenheit gegenüber der jeweiligen Asymmetrie aus.

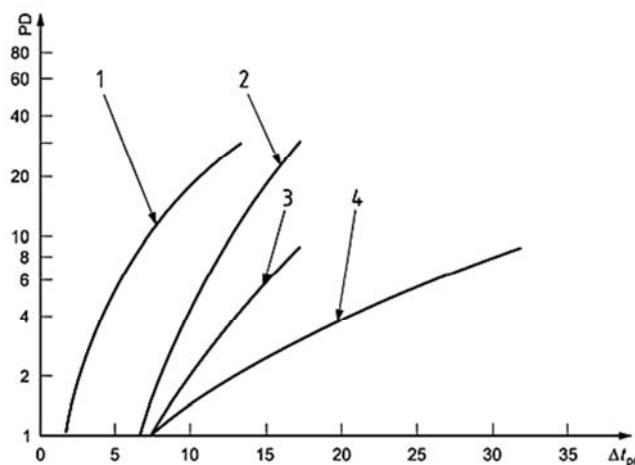


Abb. 39 Unzufriedenheit gegenüber Strahlungsasymmetrie

Quelle: DIN EN ISO 7730 (2006)

### Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchtigkeit ist in Bezug auf die Behaglichkeit nur bei höheren Raumlufttemperaturen interessant. Wie aus [IDK e.V. (2009)] zu erkennen ist, schwankt die relative Feuchtigkeit in der Klosterkirche St. Marienstern im Jahresmittel um ~70 %. Unter der Voraussetzung, dass eine lokale Temperierung am Chorgestühl erfolgt, so ist der Bereich von 35 % - 70 % Luftfeuchtigkeit, bei einem Temperaturbereich von 19 °C – 23 °C, als behaglich definiert.

### Luftgeschwindigkeit

Das bestimmende Element in der thermischen Behaglichkeit ist neben den bereits genannten Temperaturen die Luftgeschwindigkeit bzw. die Luftbewegung. Für große und kalte Luftbewegungen, die nebenher auch noch eine hohe Geschwindigkeit aufweisen (z.B. Kaltlufteinfall aus

dem Bereich der nordseitigen und östlichen Kirchenfenster), wird der Begriff „Zugluft“ verwendet. Dabei kühlt die anströmende Kaltluft die betroffenen Hautpartien aus und es entsteht ein Abkühlungsreiz. Dieser ist im Besonderen abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, dem Turbulenzgrad sowie der Lufttemperatur. Die folgende Abb. 40 zeigt ein Behaglichkeitsfeld auf. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Abbildung nur vereinfacht dargestellt ist.

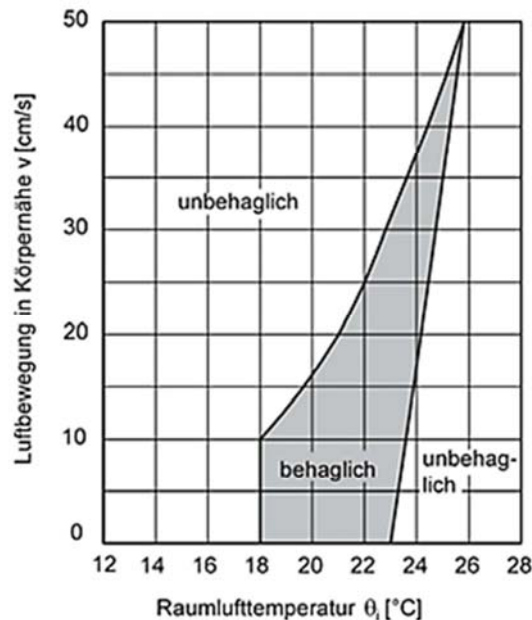


Abb. 40 Behaglichkeitsfeld - Luftgeschwindigkeit  
Quelle: Willems, Wolfgang M. (2006)

Verändert sich die Anströmrichtung von dem Gesichtsbereich zum Nacken- oder Fußbereich ist das Diagramm nur noch eingeschränkt nutzbar, da sich der Empfindlichkeitsbereich verstärkt. Das bedeutet, dass ein Mensch Zegerscheinungen im Nacken-, Rücken- und Fußbereich besonders unbehaglich empfindet. Kommt es im Raum noch zu turbulenten Strömungen, werden diese Geschwindigkeitsveränderungen auf der Haut als Kältereiz wahrgenommen. Weiterhin besteht die Möglichkeit einen lokalen Turbulenzgrad sowie das Zugluftrisiko nach DIN EN ISO 7730 zu bestimmen. Jedoch muss an dieser Stelle betont werden, dass sich zum einen die Raumtemperatur in der Klosterkirche deutlich unter dem Behaglichkeitsfeld befindet und zum anderen eine Zugluft im Raum schon vorhanden ist.

### 9.3 Physiologische Bedingungen

Unter physiologischen Bedingungen der thermischen Behaglichkeit werden grundsätzlich alle zusätzlichen Faktoren verstanden. Darunter ist die allgemeine körperliche Verfassung, das Alter, Geschlecht, Nahrungsaufnahme, ethnische Einflüsse und die Konstitution eines Menschen zu verstehen. In Bezug auf das Kloster sollen hier nur wenige Dinge genannt werden. Der Altersdurchschnitt liegt zzt. bei ~ 55 Jahren. Davon sind die jüngste Schwester 27 Jahre und die älteste 89 Jahre alt. Weiterhin ist anzumerken, dass Frauen eine um 2-3 K höhere Temperatur als behaglicher empfinden. Ebenso trifft dies für ältere Menschen zu.

## Intermediäre Bedingungen

Eine der wichtigsten intermediären Bedingungen ist die Bekleidung. Weiterhin sollen noch zusätzliche Faktoren wie Aktivitätsgrad, Raumbesetzung, psychosoziale Faktoren, Tages- und Jahresrhythmus sowie Adaption und Akklimatisierung genannt werden. Um eine bessere Übersicht zu bekommen, sollen hier nur die wichtigsten Bewertungen einzeln dargestellt werden.

### Aktivitätsgrad

Die Aktivitäten eines Menschen werden in Tätigkeitsgrade untergliedert. Je nach Schwere der Tätigkeit werden die Raumtemperaturen anders empfunden.

### Bekleidung

Die Bekleidung hat einen großen Einfluss auf die Behaglichkeit eines Menschen. Durch einen guten Dämmwert der Kleidung kann ein unbehagliches Raumklima ausgeglichen werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Dämmwerte, sowie die damit verbundene Änderung der operativen Temperatur, wird in der DIN EN ISO 7730 sowie in der DIN ISO 9920 aufgezeigt.

Die folgende Abb. 41 zeigt die Kleiderordnung der Schwestern im Kloster St. Marienstern. Dabei dient die Kukulle als Bekleidung für besondere Anlässe und erhöht die Dämmeigenschaften, da sie über die Kleider der rechten Darstellung gezogen wird. Interessant ist, dass trotz des Tragens eines Velans Zugescheinung von den Schwestern im Nacken zu spüren sind – ein sicheres Anzeichen für die Intensität der Strömungen im Raum.



Abb. 41 Kleiderordnung St. Marienstern  
Quelle: Birgid Frei in Anlehnung an o.V. (02/2011)

## Akustische Behaglichkeit

Um die akustische Behaglichkeit beurteilen zu können, kann diese über das Messen der Schallgröße bestimmt werden. Die Schallgröße wird über ein logarithmisches Maß beschrieben, um das menschliche Hören besser nachzubilden und um den weiten Bereich des Hörvermögens besser erfassen zu können. Der Schalldruckpegel wird folgendermaßen definiert:

$$L(t) = 10 \log \frac{p(t)^2}{p(0)^2} \quad (1-6)$$



Die Schallpegelmessung wird je nach Zweck der Messung untergliedert.

Eine akustische Behaglichkeit lässt sich nicht genau definieren. Im Hinblick auf die neu zu errichtende Heizungsanlage im Chorgestühl lässt sich hingegen eine akustische Unbehaglichkeit besser bestimmen. Der Schallpegel liegt bei einer Kirche zwischen 15-20 dB und stellt somit eine große Herausforderung für die Anlagentechnik dar. Gleichzeitig sind Kirchen für eine gute Akustik bekannt. Die Störgeräusche könnten somit unter ungünstigen Bedingungen noch verstärken. Des Weiteren könnten durch An- und Aufbaumaßnahmen am Chorgestühl (um Zuglufterscheinungen abzuschirmen) die Raumakustik verändert bzw. der Schalldruckpegel der Orgel für die Nonnen im Chorgestühl verringert werden. Jedoch muss hinzugefügt werden, dass eine Geräuschentwicklung in einer Kirche verschiedenartig ist. Zusammenfassend sind eventuell auftretende Lüftergeräusche (resultierend aus einer möglichen Variante der Beheizung des Chorgestühls) als Hintergrundgeräusche zu klassifizieren, es ist aber davon auszugehen, dass derartige Anlagen nur bedingt eine verträgliche Geräuschentwicklung verursachen.

#### 9.4 Konzeptbetrachtung neues Chorgestühl

##### Analysieren

##### Klärung der Randbedingungen - Ausgangssituation

In der Klosterkirche St. Marienstern befindet sich ein Chorgestühl aus dem Jahr 1962. Dieses Gestühl verfügt über eine Fußbodenheizung (Abb. 42), welche gravierende Mängel aufweist. Besonders die fehlende Wärmedämmung der Rohrleitungen gegenüber dem Untergrund sowie der wenig sinnvolle Aufbau des betreffenden Fußbodenbereichs lässt die Heizleistung rapide absinken. In Verbindung damit verschlechtert sich das Behaglichkeitsempfinden der Schwestern nicht nur im Fußbereich. Die geringe Durchschnittstemperatur ( $\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in der Kirche und die kalte Fallluftströmung – hervorgerufen durch die kalten inneren Oberflächen der Nordfenster insbesondere in den Wintermonaten – gestalten einen längeren Aufenthalt im Chorgestühl als sehr unangenehm.



Abb. 42 Ansicht Fußbodenheizung Chorgestühl (ursprünglicher Zustand)

Quelle: Frei, Stefan (2011)

Um diesen Zustand zu verbessern, sind zwingend Veränderungen am Chorgestühl notwendig. Eine grundlegende Modernisierung der Fußbodenheizung und die wenig Schutz bietenden, sitzumschließenden Einfassungen im Standbereich der Schwestern lassen einen Neubau des gesamten Chorgestühls sinnvoll erscheinen. Die Nonnen verbringen täglich durchschnittlich vier Stunden in der Klosterkirche. Dabei kann der Aufenthalt in drei Haltungsformen unterteilt werden (Tabelle 15).

Tabelle 15 Dauer der verschiedenen Haltungsformen  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Haltungsform	Dauer [h]
Sitzend	1,45
Stehend	1,45
Kniend	0,30

Das vorhandene (alte) Gestühl ist sehr schlicht gestaltet. Es unterliegt nicht dem Denkmalschutz. Die aus den technisch-erforderlichen Maßnahmen resultierenden Gestaltungsnotwendigkeiten für den Neubau eines Chorgestühls sind mit den Schwestern abzustimmen. Unter Einbeziehung des Denkmalamts ist eine einvernehmliche Lösung zu finden.

Die Kirche wird, wie die gesamte Klosteranlage, mit einer zentralen Warmwasserheizung beheizt.

Die mittleren Vor- bzw. Rücklauftemperaturen liegen bei:

- $t_{VL} = 55^{\circ}C$
- $t_{RL} = 42^{\circ}C$

### Erarbeiten der Anforderungsliste

Als Grundlage für die Planung wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Kloster St. Marienstern eine Anforderungsliste erarbeitet. Die Anforderungen seitens der Schwestern resultieren letztendlich daraus, dass das Chorgestühl täglicher Gebetsplatz ist und zugleich eine „Schutzfunktion“ übernimmt. Inhaltlich wurde die Liste durch die Auflistung der Wunsch-Abmessungen ergänzt. Bei diesen technischen Betrachtungen spielen optisch-künstlerische Aspekte vorerst keine Rolle.

### Konzipieren

#### Suche nach Lösungsmöglichkeiten

Mit dem Ziel, andere Denkansätze und Erfahrungen in eigene Lösungsansätze einfließen zu lassen, wurde eine Internet-, Patent- und Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurde nach Heizungsmöglichkeiten in Kirchen und nach beheizten Chorgestühlen gesucht. Festzustellen war, dass es für den betrachteten speziellen Fall keine Lösungsmöglichkeit gibt. Gerade für Heizungen im/am Chorgestühl konnte nur eine Information in [Erhard, Bernd (03/2011)] gefunden werden. Hier wird beschrieben, dass unter den Sitzen im Chorgestühl Klappen für eine Warmluftheizung angebracht sind. Im Ergebnis der Recherche stellte sich aber heraus, dass keine ähnliche Problemstellung bzw. keine expliziten Lösungsmöglichkeiten vorhanden sind.

## **Kombinieren von Lösungsmöglichkeiten**

Um eine geordnete und schnell überblickbare Übersicht aufzubauen, wird zunächst eine weitere Untergliederung getroffen. Dabei werden die Maßnahmen in aktive und passive unterschieden. Eine passive Maßnahme stellt für das Kloster einen Mehrwert dar, laufende Kosten entstehen nicht. Eine passive Maßnahme muss nicht zwingend eine aktive Maßnahme ausschließen.

### **Passive Schutzmaßnahmen**

#### *Standort Chorgestühl*

Wie schon im Kapitel 2 beschrieben, trifft ein Kaltluftstrom in einer Höhe von 1,50 m – 2 m auf das Chorgestühl. Besonders betroffen sind die äußeren Sitzplätze am Ostende. Durch einen „einfachen“ Standortwechsel in Richtung Westen wäre es möglich, das Gestühl aus dem stark strömenden in einen zugluftärmeren Bereich zu versetzen.

In Verbindung mit den Stützsäulen in der Kirche bietet sich eine weitere Möglichkeit an. Dazu müsste das Chorgestühl zwischen den Säulen (Abstand ~4,70m) aufgebaut werden. Die Säulen fungieren dabei als Blenden, die die besonders gefährdeten Randbereiche abschirmen (Windschatten). Nachteilig wirkt sich in dieser Anordnung die begrenzte Breite durch die Säulenabstände aus. Weitere Nachteile dieser Variante sind:

- eine zweite Chorreihe wird erforderlich,
- die vordere Reihe bekommt nur eine unzureichende Umschließung, da sonst die Sichtachsen zum gegenüberliegenden Gestühl unterbrochen werden,
- die vordere Reihe wird nur teilweise von der Säule verdeckt – damit kommt es zu einer unterschiedlichen Behaglichkeit zwischen den Reihen,
- der Zugang für die hintere Sitzreihe ist nur gewährleistet, wenn die vordere Reihe weniger Sitzplätze aufweist.

#### *Umschließung des Chorgestühls*

Die sicherlich effektivste Variante ist die Einhausung des Chorgestühls durch das Anbringen von Zwischen- und Seitenwänden (Chorwangen), einer Rückwand, Pultwangen, Türen sowie eines Zierdachs(Baldachin). Viele dieser Elemente sind als Sicht- und Zugluftschutz schon im alten nicht mehr benutzten Gestühl auf der Empore der Klosterkirche eingesetzt. Diese Maßnahmen hätten, wie auch Anbauten in Chorgestühl anderer Kirchen, in erster Linie eine funktionale Eigenschaft und Wirkung. Daraus lässt sich ableiten, dass bereits früher aus Behaglichkeitsgründen eine Umbauung stattgefunden hat. Das vorhandene (alte) Chorgestühl besitzt diese Elemente höchstens in unzureichender Form.

Für erste Untersuchungen wurden nachträglich Türen an das Chorgestühl angebaut. Eine deutliche Verringerung der Zugscheinung im Fußbereich konnte erreicht werden. Des Weiteren wurden Strömungsversuche mit einer provisorisch aufgebauten Rückwand durchgeführt. Bei Versuchen im März 2011 konnten die Ergebnisse der ersten Untersuchungen bestätigt werden.

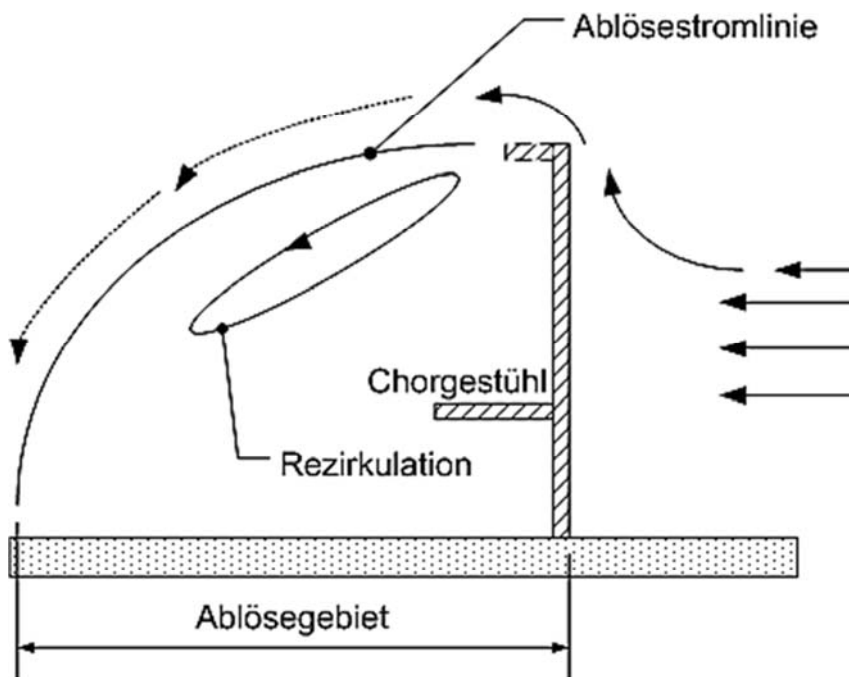


Abb. 43 Strömungsverlauf am Chorgestühl  
Quelle: In Anlehnung an Hanel, Bernd (1990)

Wie in der Abb. 43 zu sehen ist, stellt das Chorgestühl mit der Rückwand einen größeren Körper dar, als ein Gestühl ohne Wand. In einer Strömung können besonders scharfkantige, breite und quergestellte Körper ein großes Ablösegebiet hervorrufen. Es besteht das Risiko, dass die Ablösestromlinie bis ins gegenüberliegende Chorgestühl hineinreicht und dadurch die örtlichen ungünstigen Strömungsverhältnisse noch verstärkt werden. Im konkreten Fall konnte mit Nebelversuchen ein schnelles Absinken der Strömung nachgewiesen werden. Von Vorteil war, dass die Strömung nicht rechtwinklig auf das Chorgestühl auftraf. Vorteilhafte Wirkung hat ein Zierdach, da sich Rezirkulationsströmungen erst später aufbauen. Ein großes Dach schafft bessere Strömungsverhältnisse im abzuschirmenden Bereich. Da die Schwestern während des Gottesdienstes auch stehen, wird ein ausreichend breites Dach empfohlen. Zusätzliche Versuche zeigten, dass mit weiteren passiven Maßnahmen zur Vermeidung der anströmenden Zugluft vom Altar, keine bessere Wirkung erzielt werden konnte. Alle neuerlichen Anbauten stellten eine Einschränkung der Sichtachse dar und/oder verändern die Akustik erheblich. In Bezug auf die Umschließung des Chorgestühls ist festzustellen, dass eine besonders breite Chorwange von Vorteil ist, da diese die anliegende Strömung wirksam ablenkt. Darüber hinaus sollten in das neue Chorgestühl hohe Türen integriert werden. Ein Beispiel wird dazu als Schnittdarstellung sowie als Modellskizze in der Abb. 44 gegeben.

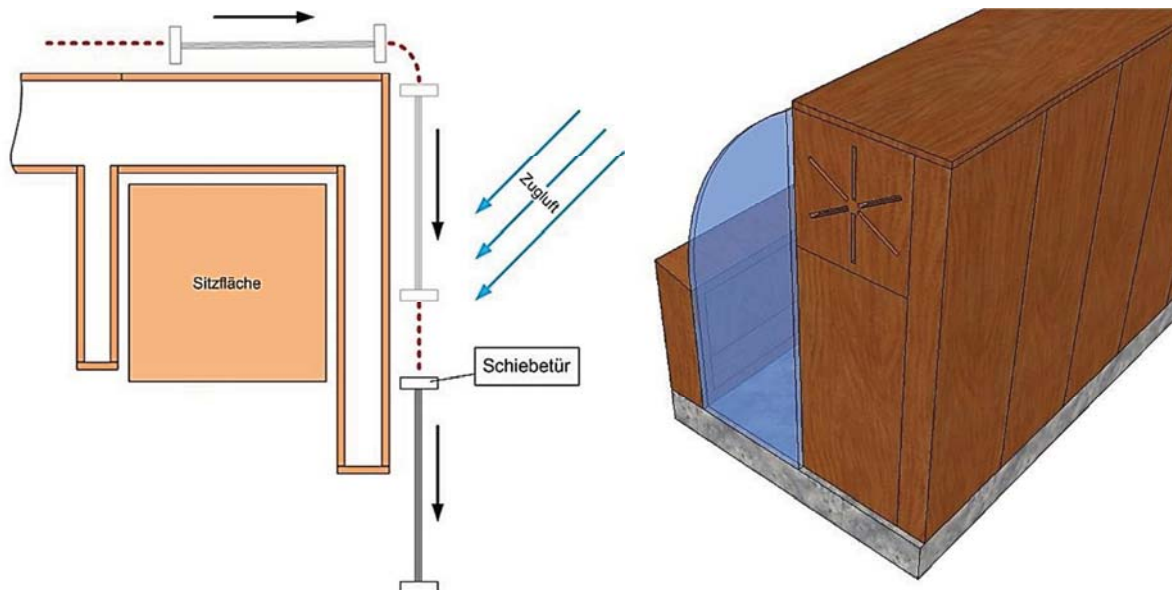


Abb. 44 Beweglicher Windfang an der Chorwange  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### *Standort Schwestern*

Weiterhin ist der Standort der Schwestern ein wichtiger Punkt. Während sich die Schwestern im alten Chorgestühl sehr nahe am Pult aufgehalten haben, erscheint es für die Zukunft günstiger, die abschirmende Wirkung des Chorgestühls zu nutzen und direkt am hochgeklappten Sitz zu bleiben. An den Sitzen könnten sogenannte Sitzleisten (Misericordien) installiert werden. Diese würden wie im alten Gestühl beim langen Stehen als Stütze wirken.

### *Zusammenfassung Passive Schutzmaßnahmen*

Zusammenfassend gilt zu sagen, dass alle passiven Schutzmaßnahmen eine Verringerung des Einflusses der Zugluft darstellen, die Zuglufterscheinung in der Kirche bleibt unverändert bestehen. Obwohl einer Standortänderung des Chorgestühls grundsätzlich zuzustimmen ist, erscheint ein Umsetzen zwischen die Säulen nicht sinnvoll. Eine zweite Chorreihe müsste entstehen. Aus den o.g. Gründen wird von einer zweiten Chorreihe grundsätzlich abgeraten. Optimal wäre eine Umschließung des Chorgestühls in Verbindung mit einer geringfügigen Änderung der Positionen der Schwestern im Chorgestühl. Eine strömungsablenkende Dachform stellt diesbezüglich einen zusätzlichen Gewinn dar. Der sich aus dieser Empfehlung ergebende Aufbau (Rückwand, Dach, Zwischenwand, Chorwange, Pultwange, hohe Tür) wird als Grundlage für alle weiteren aktiven Schutzmaßnahmen genutzt.

### *Aktive Schutzmaßnahmen / 3-Zonenmodell*

Ziel ist, eine thermische Behaglichkeit für die Schwestern im Chorgestühl zu schaffen. Dafür kann eine aktive Maßnahme zur Warmhaltung/Erwärmung des Körpers im Bedarfsfall von einer passiven, bereits dargestellten Lösung unterstützt werden. Grundgedanke einer aktiven Schutzmaßnahme ist, nur den Aufenthaltsbereich der Nonnen zu temperieren. Wenn dies gelingt, kann im Gegensatz zur Temperierung der gesamten Kirche nennenswert Energie gespart werden. Verstärkt wird dieser Ansatz durch [Ahrendt, Claus (1993)]. Hierbei wird von einer besonders schonenden Heizweise für die Kirche gesprochen, wenn mehrere verschiedene Heizsysteme miteinander kombiniert werden. Dabei gewährleistet ein System die Grundtemperierung und das andere wird nur zur Behaglichkeitssteigerung im Gottesdienst genutzt. Durch

das Einbringen von Wärmeenergie in ein Kirchengebäude sind mehrere Besonderheiten bei der Planung zu beachten.

Wie in [IDK e.V. (2009)] nachzulesen ist, wurde die Klosterkirche, insbesondere die Farbgebung, in der Vergangenheit durch die eingebaute Heizungstechnik (hier: Anordnung der Gliederheizkörper und Betrieb mit sehr hohen Vorlauftemperaturen) sehr geschädigt. Um eine weitere Schädigung des Bauwerks in Zukunft zu vermeiden, wurde die Forderung aus der DIN 15759-1 sowie den Richtlinien für die Beheizung von Kirchen [Schotes, Paul (04/2011)] mit in die nachfolgende Bewertung einbezogen.

Die Nonnen verändern während der Messe in relativ regelmäßigen zeitlichen Abständen ihre Positionen (Sitzen, Stehen, Knien). Durch das Wechseln ihrer Haltung sind somit immer unterschiedliche Körperregionen zu erreichen und zu erwärmen. Gleichzeitig verändern sich die Abstände der betreffenden Körperoberflächen zu den Heizflächen. Dabei kann eine vorher perfekt auf das Sitzen abgestimmte Heizungsart beim Stehen unbehaglich wirken. Randbedingungen, die aus der Nutzung bzw. aus Nutzungsgewohnheiten resultieren, machen die Untersuchungen für eine geeignete Beheizungsmöglichkeit relativ schwierig. Das Erhalten einer der Sichtachse oder auch das in das Pult vor den Schwestern eingebrachte Bücherregal sollen an dieser Stelle besonders erwähnt werden.

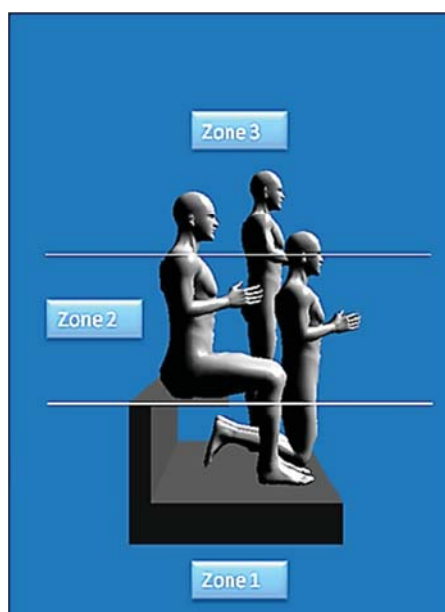


Abb. 45 3-Zonenmodell

Quelle: Frei, Stefan (2011)

Um diese Konflikte zu umgehen, wurde von „Frei“ ein Modell entwickelt, wie es in Abb. 45 zu sehen ist. Die drei möglichen Positionen der Schwestern werden aufgezeigt und in drei Grundzonen unterteilt. Für eine noch genauere Analyse wurden die einzelnen Bereiche weiter untergliedert. Den Zonen wurden übliche Heizsysteme zugeordnet. Aus der Vielzahl der möglichen Heizungsarten lässt sich somit sehr schnell für jede Zone eine passende und bewertete Anwendung finden. Eine technisch -wirtschaftliche Bewertung zeigt, wie im Folgenden deutlich wird, die günstigste Lösung. Die in Abb. 46 aufgezeigten Systeme sollen die Problemstellung noch einmal verdeutlichen. Ausgehend von einer ständig sitzenden Position der Nonnen während des Gottesdienstes, könnten zum Beispiel Heizstrahler oder auch Kirchenbankkonvektoren zur Anwendung kommen. Da aber die Sitzfläche klappbar gestaltet werden muss, erweist sich dieser Vorschlag als untauglich. Die Gefahr einer Verbrennung ist speziell beim Heizstrah-

ler nicht auszuschließen. Auch für den Fußbereich denkbare Rohrheizkonvektoren oder Rohrheizkörper können durch die geforderte Geometrie des neuen Kirchengestühls (vor allem wegen des Abstands zwischen Pult und Sitzfläche) nicht eingesetzt werden.

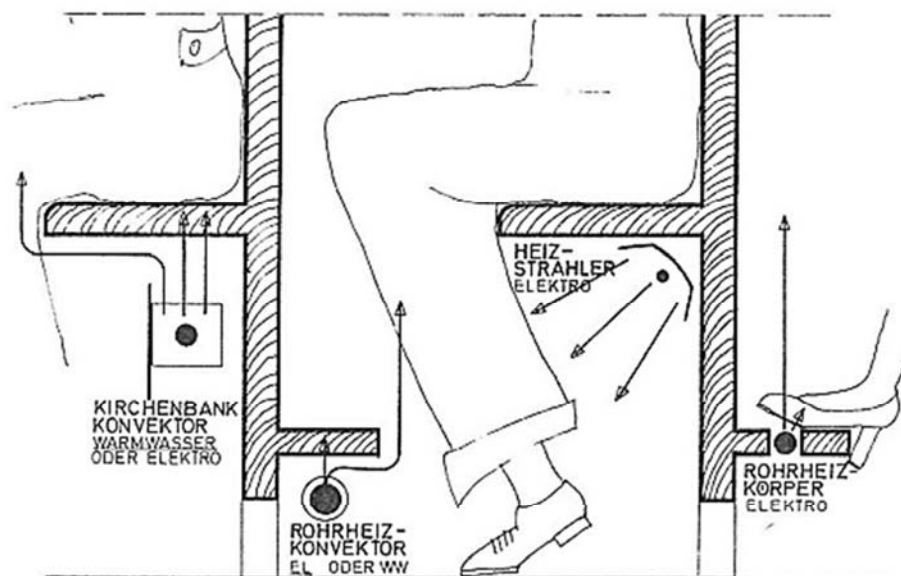


Abb. 46 Aufzeigen von verschiedenen Heizungsarten  
Quelle: Ehrhardt, Bernd (03/2011)

Um eine Übersicht in dieser Arbeit zu bewahren, werden die einzelnen Zonen sowie die dazugehörigen aktiven Maßnahmen an dieser Stelle nicht weiter aufgelistet.

### Technische und wirtschaftliche Bewertung / 3-Zonenmodell

#### *Wichtung durch das Klosters St. Marienstern*

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung wurde in enger Absprache mit dem Kloster St. Marienstern, insbesondere mit der damaligen Cellerarin Schwester Paulina, durchgeführt. Wichtig war, welchen Wert die Schwestern auf verschiedene Faktoren einer speziell erstellten Bewertungsliste legten. Das Ergebnis ist in der Abb. 47 dargestellt. Die wichtigsten Kriterien liegen demnach auf dem äußeren Ring dieses Diagramms.

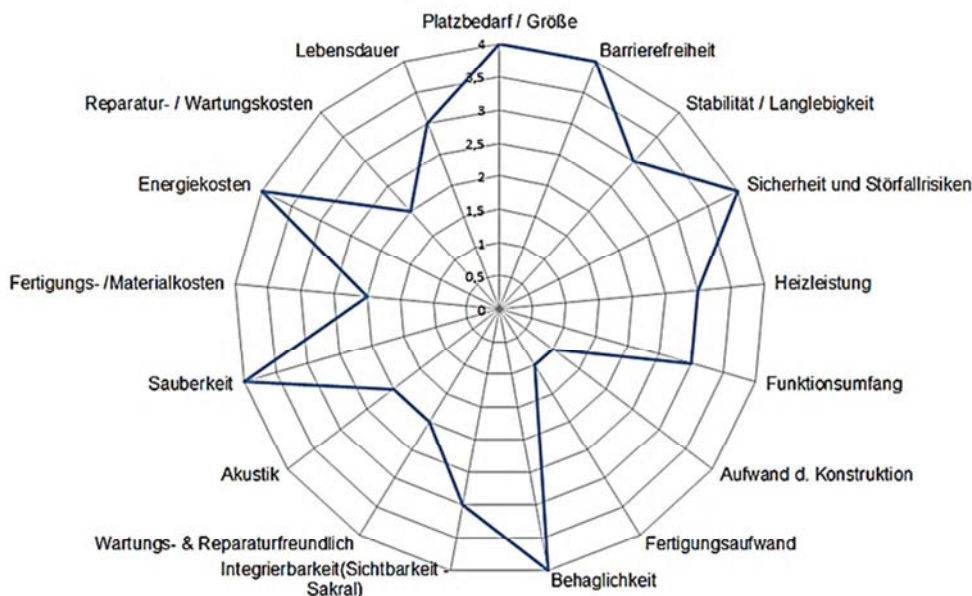


Abb. 47 Wichtung – Kloster St. Marienstern  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### Technisch-wirtschaftliche Bewertung Zone 3-3

Beispielhaft soll im Folgenden die technisch-wirtschaftlichen Bewertung der exponierten Zone 3-3 (Abb. 48) vorgestellt und ausführlich beschrieben werden. Dazu werden die einzelnen Varianten mit ersten Bemerkungen versehen.

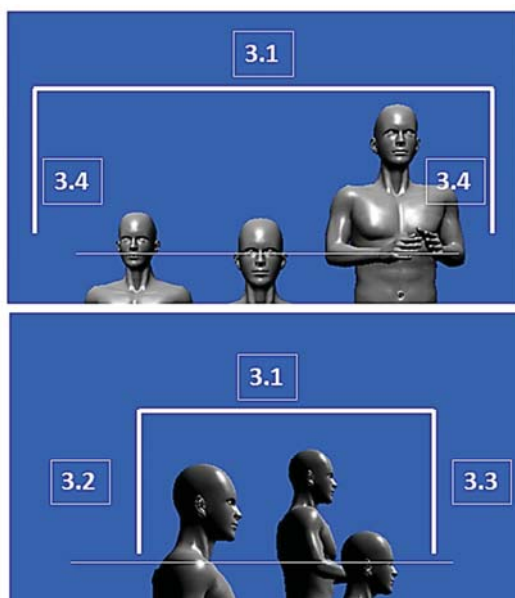


Abb. 48 3-Zonenmodell / Zone 3  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Wie in dem Abschnitt „Passive Schutzmaßnahmen“ aufgezeigt, konnte für den Gesichtsbereich (Zone 3-3) keine passive Maßnahme gefunden werden. Besonders kritisch wirkt sich dieser Bereich für die Schwestern aus, die mit dem Blick in Richtung Nordwand sitzen. Eine Lösung



zur Minderung der Zugerscheinung kann, wenn überhaupt, nur eine aktive Maßnahme bewirken.

### Variante 1

Eine möglichst großflächige und wirkungsvolle Lösung bietet ein Unterbodenkonvektor, der parallel zur Treppe angebracht wird (Abb. 49). Die Anlage saugt mit Hilfe von Ventilatoren kalte Luft an und bläst diese nach Durchgang durch einen Wärmeüberträger als Warmluft in die Klosterkirche ein. Ziel ist, dass der entstehende Luftstrahl die Kaltluft von den Fensterflächen umlenkt. Die vorhandene Kaltluftströmung, hervorgerufen durch die Nordfenster, wird verdrängt. Die Gefahr, dass die Gebäudehülle und das Inventar durch Aufwirbelung von Staub beschädigt werden, erscheint durch die kurze Nutzungsdauer und die jeweils kurze Laufzeit sehr gering. Nachteilig und Hinderungsgrund ist, dass die Granitplatten im Fußboden diagonal angeordnet sind. Der Einbau stellt einen unvermeidbar großen Aufwand dar. Zudem äußerte das Denkmalamt [konkret Herr Dr. Pinkwart; Landesamt für Denkmalschutz Dresden, persönliches Gespräch am 28.03.2011] Bedenken. Bei der späteren Bewertung findet diese Lösungsvariante deshalb keine Anwendung mehr.

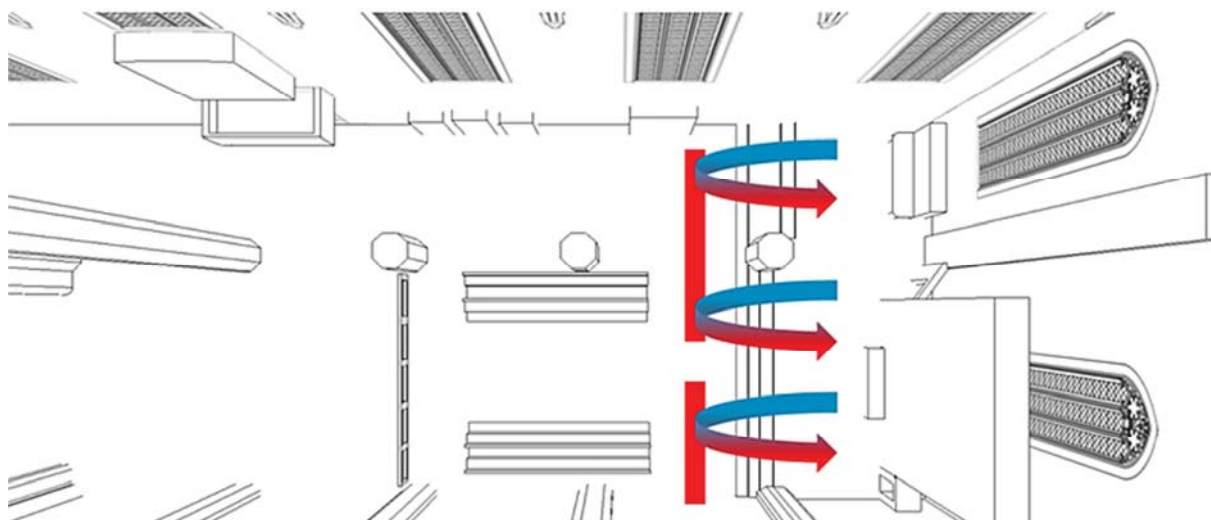


Abb. 49 Anordnung des Unterbodenkonvektors in der Kirche  
Quelle: Frei, Stefan (2011);

### Variante 2

Mit dem Ziel, eine Maßnahme so nahe wie möglich am Chorgestühl zu realisieren, könnte ein Unterbodenkonvektor (Funktion wie vor) in das Podest des Chorgestühls (Randbereich) integriert werden. Auch bei dieser Variante wären Veränderungen an den Granitplatten erforderlich. Nachteilig sind hierbei:

- der größere Austritt aus dem Chorgestühl, welcher eine Unfallgefahr darstellt
- der im Bereich des Gestühls steigende Schallpegel

### Variante 3

Um den Schallpegel zu niedrig zu halten, bietet sich eine dezentrale Warmluftheizung an. Die benötigte Warmluft wird durch einen Wärmeüberträger (Warmluftstation) im Randbereich der Kirche erzeugt. Mittels in den Kirchenboden eingelassener Verbindungskanäle wird eine Viel-

zahl von Boden-Auslassdüsen mit der Warmluft versorgt. Aufwand und zu erwartende Geräusche führen zum Verwerfen dieser Lösung.

#### Variante 4

Die vierte Lösungsmöglichkeit entstammt einer praxisnahen Anwendung, die besonders bei großen Hallentoren sowie ständig offenen Türen von beheizten Gebäuden eingesetzt wird. Ohne diese Abschirmung würde Kaltluft in das Gebäude eindringen und dieses unnötig auskühlen. Um das zu verhindern wird ein erwärmter Luftstrahl zwischen Tür und Außenbereich geblasen.

Diese Methode lehnt sich sehr stark an die bekannte Funktion einer Luftschleieranlage an. Im Gegensatz zu den hinlänglich bekannten Anlagen, müsste für die Kirche eine modifizierte Bauart zum Einsatz kommen. Eine Anordnung des Warmluftgebläses im Podest erscheint möglich. Erforderliche Luftaustrittsdüsen sind platzsparend in der Ablage anzuordnen. (Abb. 50). Strömungsgeräusche sind hier jedoch ebenso zu erwarten.

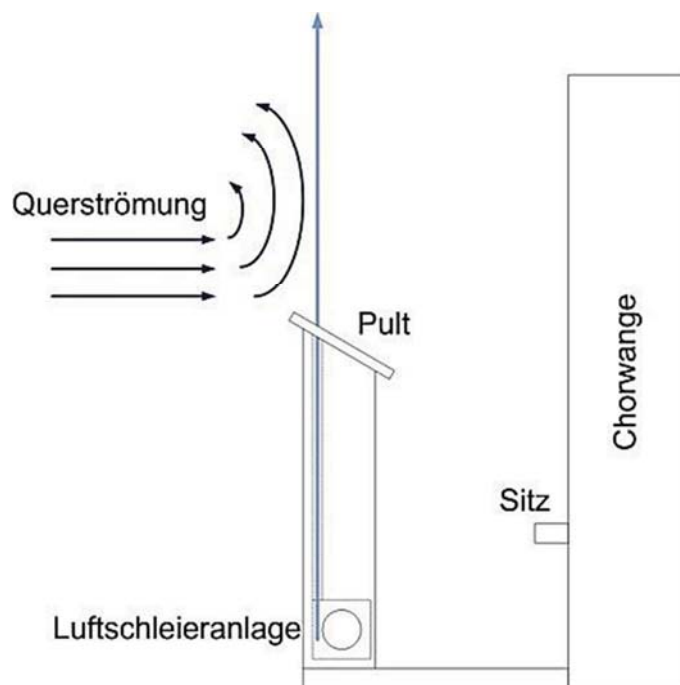


Abb. 50 Prinzipskizze einer Luftschleieranlage  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

#### Variante 5

Eine Fußbodenheizung kann unter den Granitplatten verbaut werden. Ansichtsprobleme sind ebenso wenig zu erwarten wie Strömungsgeräusche.

Der Grundgedanke ist, dass bei einer FBH neben dem hohen Strahlungsanteil auch ein Anteil an Konvektion entsteht. Diese freie Konvektion erzeugt einen – wenn i. allg. auch geringen – thermischen Auftrieb, mit dem es gelingen könnte, die Kaltluftströmung abzulenken. Wie in der Abb. 51 zu erkennen ist, werden drei verschiedenen Heizflächen angeordnet. Die mittlere Heizfläche soll das Ablösegebiet (Gebiet aufsteigender Strömung) weiter vergrößern (Abb. 43) und die Zugluft verdrängen. Die Flächen auf den Querseiten dienen als unterstützende Maßnahme.

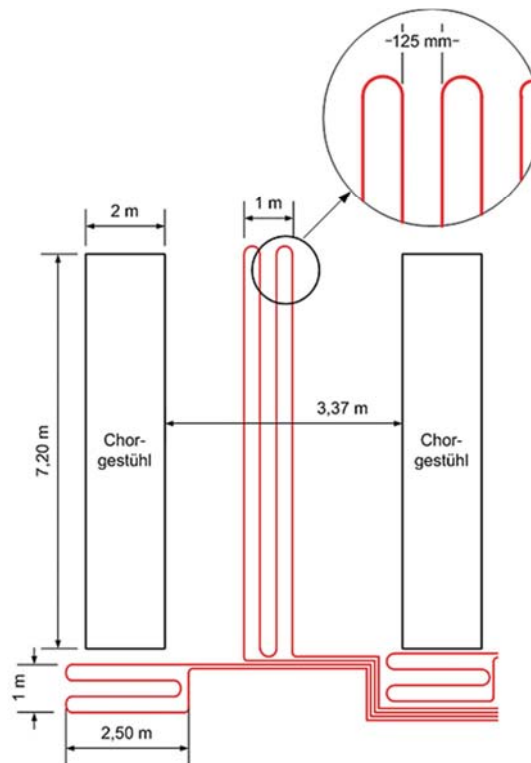


Abb. 51 Anordnung der Fußbodenheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### Variante 6

Eine weitere Lösungsmöglichkeit stellt ein in das vergrößerte Dach des Chorgestühls eingesetzte Strahlungsheizung dar. Als letzte Lösungsmöglichkeit konnte eine Strahlungsheizung ermittelt werden. In den vorderen Teil des Daches müsste ein beweglicher Strahler installiert werden. Weiterhin würde die Möglichkeit bestehen, diesen nach der eigenen (1) oder gegenüberliegenden (2) Sitzreihe auszurichten. Neben den hohen Energiekosten wird insbesondere das vergrößerte Dach als sehr nachteilig angesehen (Abb. 52).

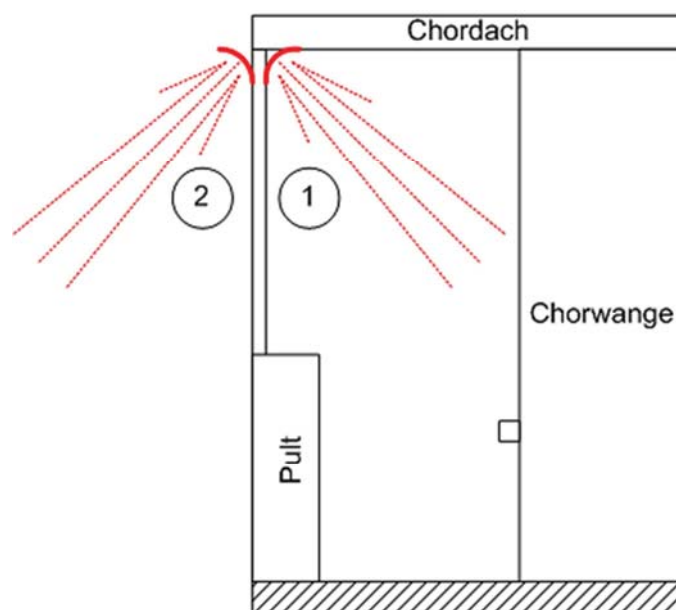


Abb. 52 Dachstrahler für eigene bzw. gegenüberliegende Seite  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### Auswertung Zone 3-3

Die verschiedenen Varianten werden in folgender Tabelle zusammengestellt und bewertet. Die Lösungen werden nach den einzelnen Kriterien beurteilt und mit der Wichtung des Klosters multipliziert. Dabei erhält die Version 10 Punkte, die alle Anforderungen erfüllt. Kommt es zu weniger Übereinstimmungen, wird diese Variante entsprechend niedriger bewertet. Tabelle 16 zeigt, wie die Summe der jeweiligen Lösungsmöglichkeit aus technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit gebildet wird. Wichtig ist bei dieser Bewertung die Gesamtsumme.

Wie in der Tabelle 16 zu erkennen ist, hat die Fußbodenheizung die höchste Gesamtpunktzahl. Um dieses Ergebnis noch besser darzustellen, werden die einzelnen Lösungsmöglichkeiten in einem Stärkediagramm (Abb. 53) abgebildet. Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Konzepte mit dem Unterbodenkonvektor sowie das Strahlerkonzept im gleichen mittleren Bereich befinden. Dementsprechend stellen diese drei Varianten eine gute technische und wirtschaftliche Lösung dar. Eine noch höhere Wertigkeit erreichen die Luftschleieranlage sowie die Fußbodenheizung, wobei die Fußbodenheizung die technisch beste Lösung verkörpert.

Tabelle 16 Bewertung der Zone 3-3  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Variante	$\Sigma$ Technische Wertigkeit (Punkte)	$\Sigma$ Wirtschaftliche Wertigkeit (Punkte)	$\Sigma$ Gesamtanzahl (Punkte)
Ideallösung	380	110	490
Unterbodenkonvektor Kirche	Nicht bewertet	Nicht bewertet	Nicht bewertet
Unterbodenkonvektor am Chorgestühl (zentral)	278	70	348
Unterbodenkonvektor am Chorgestühl (dezentral)	277	68	345
Luftschleier	335	<b>86</b>	421
Fußbodenheizung	<b>362</b>	84	<b>446</b>
Strahler	257	66	323

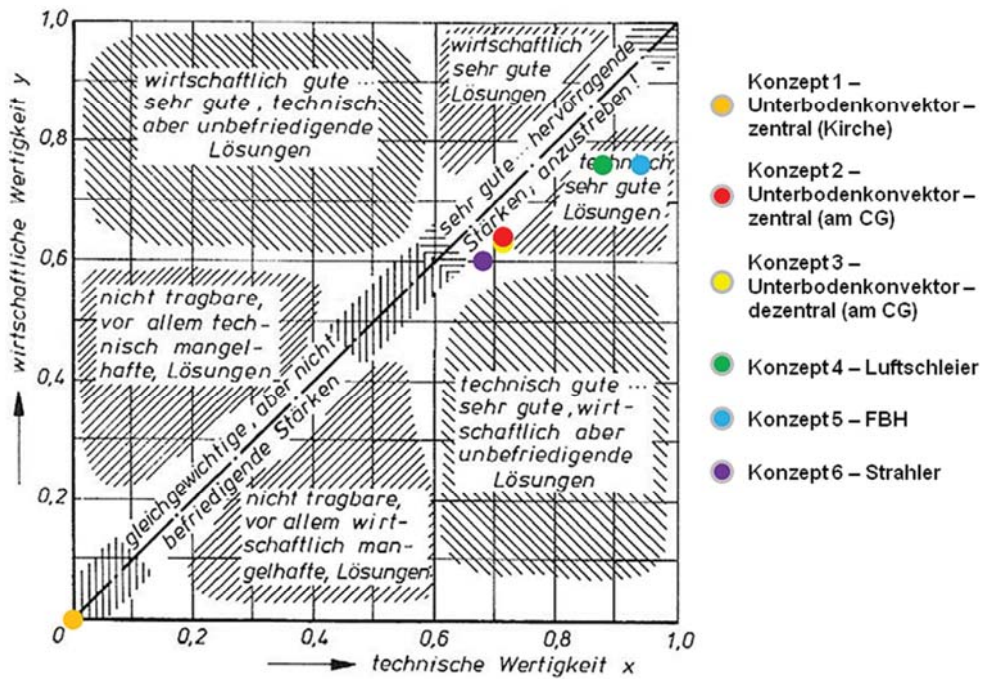


Abb. 53 Stärkediagramm Zone 3-3  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Zusammenfassung 3-Zonenmodell

Nachstehende Lösungsmatrix (Tabelle 17) zeigt, dass die wahrscheinlich beste Lösung eine Verbindung aus Warmluft- und Strahlungsheizung ist. Aufgrund der doppelten Anlagentechnik wird diese Kombination zu sehr hohen Kosten führen.

Tabelle 17 Lösungsmatrix 3-Zonenmodell  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Hauptzone Unterzone	1	2	3
1	Fußbodenheizung (Trockenaufbau)	Sitzheizung (Warmluft)	Ohne aktive Heizung
2	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)
3	Bücherregal	Bücherregal	Fußbodenheizung (Kirche)
4	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)

Bei der Betrachtung aller vorstehenden Lösungsmöglichkeiten ist zu erkennen, dass die Grundlagen aller Überlegungen auf zwei wesentlichen Systemen basieren. Die Wärme wird entweder durch das Medium Wasser oder durch das Medium Luft in das Chorgestühl eingebracht. Einheitlich wird davon ausgegangen, dass beide Systeme mit Wärmeenergie aus der Zentralheizung versorgt werden. Andere Erwägungen, wie beispielsweise den Wärmeenergieeintrag mittels Elektroenergie zu realisieren, führt zu keiner wirtschaftlich vertretbaren Lösung.

### Anfertigen von Prinzipskizzen

Die Abb. 54 zeigt ein vollständig mit Warmluft betriebenes Heizsystem. Zu erkennen ist, dass es sich hierbei um ein offenes System handelt. Es wird charakterisiert durch einen Luftauslass am Pult, im Fußboden sowie am Dach. Dadurch werden Kaltluftströme umgelenkt und Behaglichkeit geschaffen. Die Kanalführung befindet sich in der Rückwand sowie im Fußboden. Eine gleichzeitige Erwärmung dieser Flächen ist nicht ausgeschlossen und ein angenehmer Nebeneffekt. Die zweireihige Anordnung ist dabei weniger von Bedeutung.

Eine Auflistung aller Vor- und Nachteile dieser Konstruktion soll in der Tabelle 18 aufgezeigt werden.

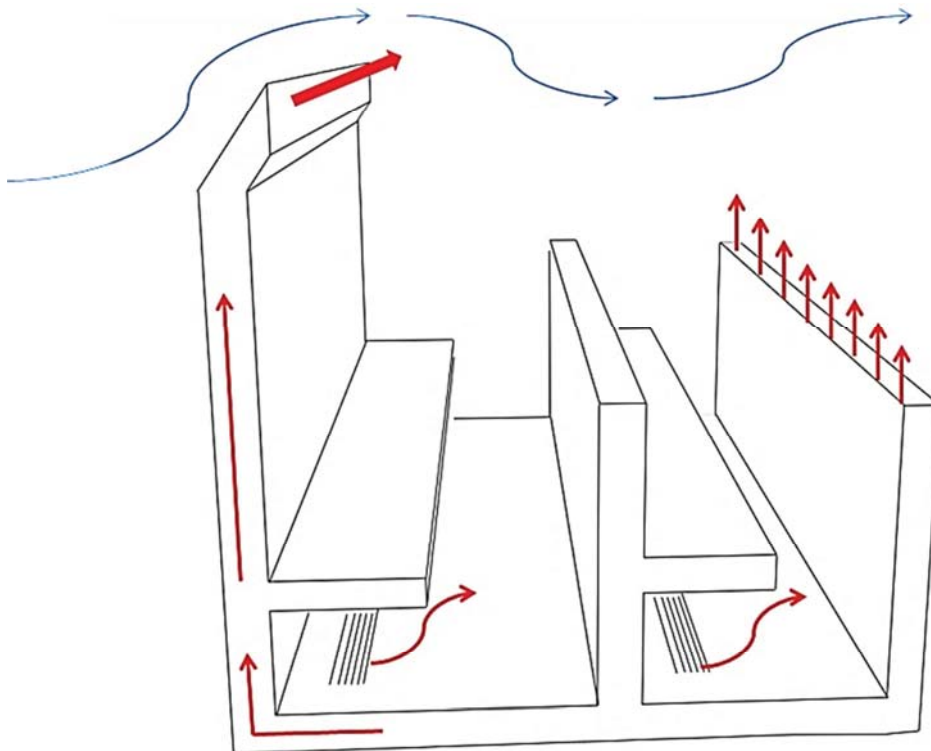


Abb. 54 Prinzipskizze Luftheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Tabelle 18 Vergleich Warmluftheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Vorteile		Nachteile	
1	Kostengünstig(Aufbau)	2	Ungünstige Warmluft-Verteilung
3	Aktive Umlenkung der kalten Fallluft	4	Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit
5		6	Betriebskosten(Ventilator)
7		8	Wartungs- und Reinigungskosten
9		10	Luft- / Raumverschmutzung
11		12	Geräuscentwicklung durch die Gebläsemotoren
13		14	Zugerscheinung

Im direkten Vergleich beider Systeme überwiegen die Vorteile der Wasserheizung (Tabelle 19).

Tabelle 19 Vergleich Wasserheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Vorteile		Nachteile	
15	Gute Temperaturverteilung	16	Hohe Kosten(Investition)
17	Lokale Temperierung	18	Holzaustrocknung
19	Geringe Verschmutzung	20	
21	Geringe Luftfeuchtigkeitsschwankung	22	
23	Keine Geräuscentwicklung	24	
25	Separater Wasserkreislauf(Pumpe, Ausdehnungsgefäß, Regelung)		

### Festlegung des Konzeptes

Aus der Erkenntnis der Kapitel „Zusammenfassung 3-Zonenmodell“ und „Anfertigen von Prinzipskizzen“ wird die Lösungsmatrix aus der Tabelle 17 als Konzept festgelegt. Das Gesamtkonzept ergibt sich somit aus Tabelle 17 und passiven Maßnahmen. Für jeden Sitzplatz wird eine vollflächige Heizung der Rückwand, der Chorwange, der Zwischenwände und des Fußbodens vorgesehen. Grundlage für das Chorgestühl ist ein Leseputz, ein Dach sowie beidseitig hohen Türen.

### Entwerfen

#### *Erarbeitung eines maßstäblichen Entwurfs*

In die Erarbeitung eines maßstäblichen Entwurfs müssen sowohl gestalterische als auch technische Einflüsse berücksichtigt werden. Die notwendigen Heizflächen sind mit Abmaßen zu bestimmen und für die Wirksamkeit der Heizanlage dementsprechend auszulegen. Diese „Basisabmaße“ können in der späteren „künstlerischen“ Gestaltung vergrößert werden. Alle übrigen

nicht genutzten Flächen sind ebenfalls frei gestaltbar. In Abb. 55 ist das Chorgestühl als Flächenmodell dargestellt. Dabei stellt die orange markierte Fläche die Heizungs- und die gepunktete die freie Gestaltungsfläche dar.

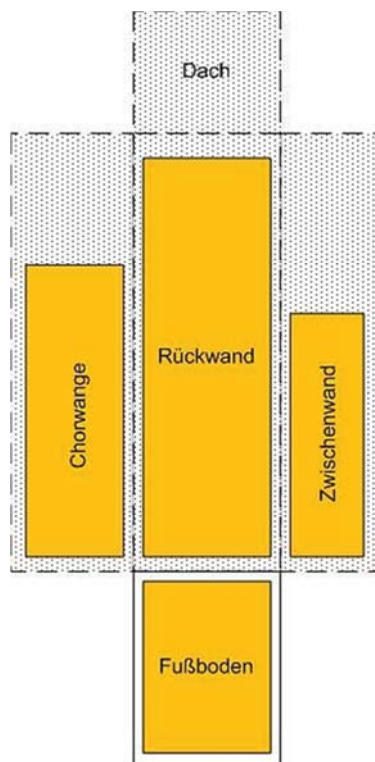


Abb. 55 Flächenmodell Chorgestühl  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Generell muss die reale Möglichkeit gegeben sein, am Heizungssystem im Chorgestühl zu jeder Zeit Wartungs- und Reparaturarbeiten vornehmen zu können. Dies wird bei der erarbeiteten technischen Lösung durch ein Trägerelement realisiert, welches fest und thermodynamisch gut leitend mit der Kapillarrohmatte verklebt ist. Das komplette Element sollte mit künstlerisch frei gestaltbaren aber unbedingt lösbaren Blenden verkleidet werden. Die zum Einsatz kommenden Heizelemente sind für eine Modulbauweise geeignet. Vorteile dieser Lösung sind:

- Die Fertigung kann getrennt vom Aufbau erfolgen.
- Mehrere Gewerke können gleichzeitig an verschiedenen Orten arbeiten.
- Einfacher Transport und Aufbau
- Gute und einfache Wartung

#### *Entwurf Fußbodenheizung Chorgestühl*

Die Verwendung einer Standard-Fußbodenheizung (Trockenbauweise) bietet einen entscheidenden Vorteil. Für die Verbindung des eigentlichen Chorgestühls mit der Bodenplatte ist „problemlos“ möglich. Die Trockenbauvariante ist reaktionsschnell. Die Aufheizzeit wird verkürzt und Energie gespart. Problematisch stellt sich der trotz Fußbodenheizung von den Schwestern geforderte Holzboden dar. Die Firma Danfoss bietet nicht als einziger, aber als bekannter Markenhersteller ein geeignetes System an. Bei dieser technischen Lösung werden die Dielen direkt auf der Fußbodenheizung verlegt. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile, wurde sich für die



Produktreihe „Speed up ECO“ entschieden. Dieses bietet neben der einfachen Verlegung den Vorteil, dass die Wärmeleitbleche schon werkseitig verklebt sind. Bei der Auslegung nach der DIN 1264-4 [DIN EN 1246/1-5; 2009] gilt bei einem Grundwasserspiegel > 5 m folgende Mindestanforderung für die Wärmeleitwiderstände unter den Leitungen des Fußbodenheizsystems.

$$R_{\lambda} > 1,25 \frac{m^2 K}{W} \text{ (gegenüber Erdreich)}$$

Da in der Kirche der Wert nur bei 1,5 m liegt, wird der Wärmeleitwiderstand vergrößert und auf

$$R_{\lambda} = 2 \frac{m^2 K}{W} \text{ festgelegt.}$$

Vor dem Hintergrund einer sicheren und „einfachen“ Befestigung des Chorgestühls auf der Bodenplatte wird eine mäanderförmige Verlegung gewählt. 2 Heizkreise sollen das Temperaturgefälle an der Oberfläche gering halten (Abb. 56).

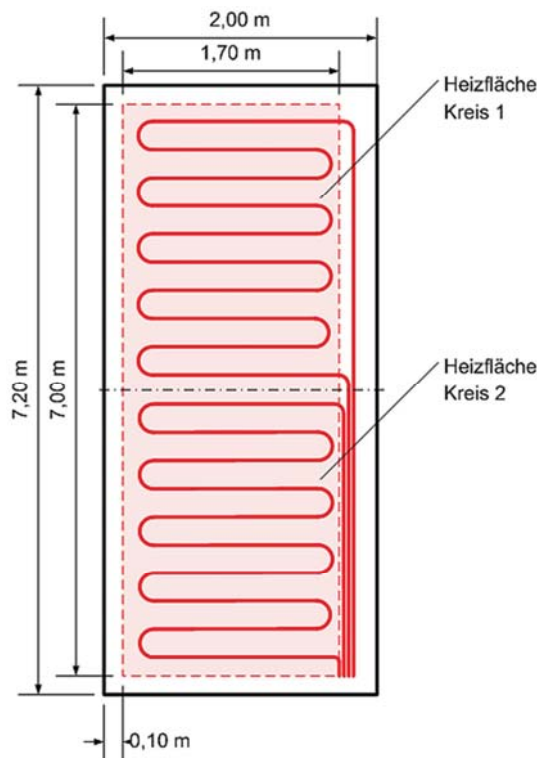


Abb. 56 Rohranordnung Fußbodenheizung Chorgestühl

Quelle: Frei, Stefan (2011)

In Verbindung mit Fußbodenheizungen eignen sich vor allem zwei- bis dreischichtige Landhausdielen aus Eiche, Kirsche und Nussbaum. Lärche – als Wunsch vom Kloster – ist eher ungeeignet. Die verwendeten Hölzer dürfen wegen der Gefahr der Spaltenbildung nur eine geringe Restfeuchte von 9 % ( $\pm 2$  %) besitzen. Die Oberflächentemperaturen sind daher auf  $\sim 29$  °C zu begrenzen. Unvermeidbare Lufteinschlüsse bei der Montage können zu einer Leistungsminde- rung gegenüber den Herstellerangaben führen. Von einer vollständigen Verschraubung der Die- len ist wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien und einer damit einhergehenden sehr wahrscheinlichen Geräuschbildung abzusehen.

Eine andere Variante ist die Verwendung von Granit als Oberbelag. Das Grundsystem „Speed up Eco“ der Firma Danfoss wurde beibehalten. Die Entwürfe für beide Varianten werden in der Abb. 57 sowie in der Abb. 58 aufgezeigt.

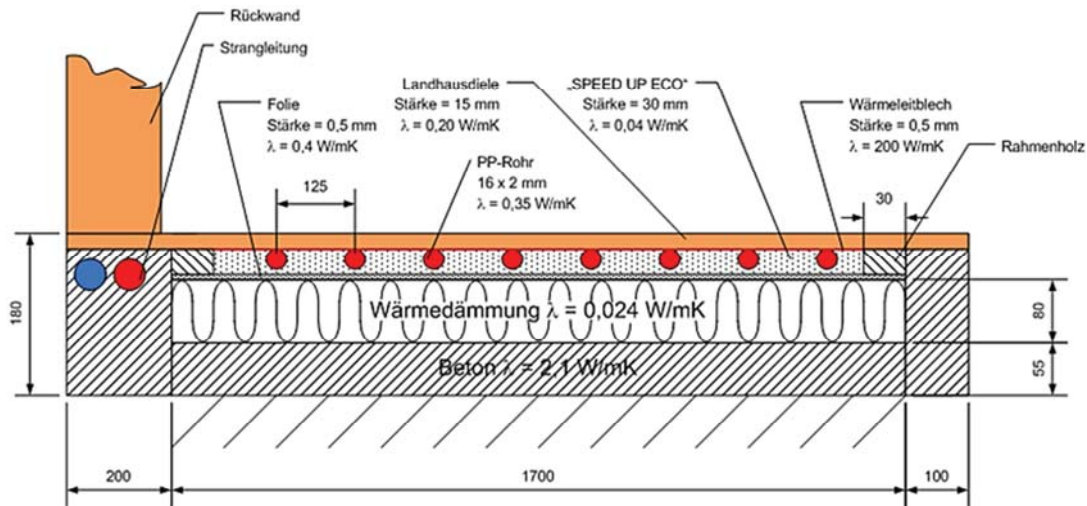


Abb. 57 Variante Dielenfußbodenheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

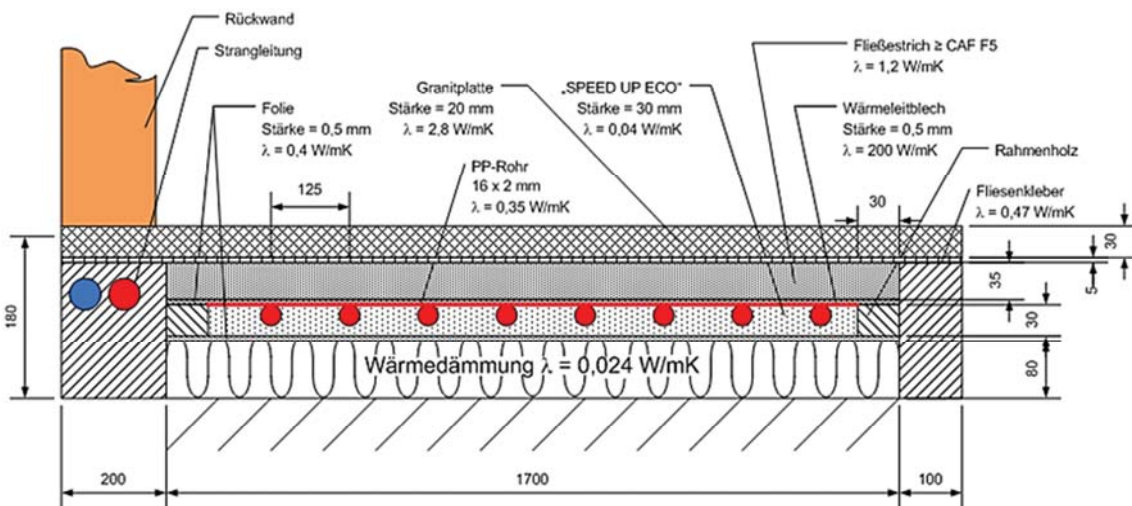


Abb. 58 Variante Granitfußbodenheizung  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

## Entwurf Rückwand

Für die Beheizung des eigentlichen Chorgestühls sind die Elemente, die im Fußboden Verwendung finden, nicht geeignet. Für das Chorgestühl wird eine Kapillarrohrrmatte favorisiert. Die vorgefertigte Matte besteht aus Polypropylen-Rohrleitungen 3,4 x 0,55 mm mit einem Achsabstand von 10 mm. Die einzelnen Strömungswege sind über je einen Sammler und Verteiler verbunden. Die geringe Aufbauhöhe ermöglicht die direkte Beheizung des Chorgestühls ohne nennenswerte Schwächung der Trägerelemente. Weitere Vorteile sind:

- sehr homogene Wärmeverteilung
- geringe Druckverluste
- kurze Anheizzeit
- geringe Temperaturwelligkeit
- hohe Wärmestromdichte bei niedrigen Vorlauftemperaturen
- schnelle Regelbarkeit

Nach Angaben des Herstellers kann das Polypropylen mit Kupferionen reagieren und dadurch seine physikalischen Eigenschaften ändern. Darüber hinaus sind die Rohrleitungen nicht diffusionsdicht gegenüber Sauerstoff. Daher werden die Kreisläufe des Chorgestühls über einen nicht kupferhaltigen Wärmeübertrager an das Heizungsnetz angeschlossen. Im Kreislauf „Chorgestühl“ dürfen nur korrosionsfeste Materialien wie Kunststoffe, Edelstahl und Rotguss Verwendung finden. Die Systemtrennung mittels Wärmeübertrager hat den großen Vorteil, dass im Fall einer Havarie nur eine sehr geringe (begrenzte) Wassermenge im Bereich des Chorgestühls austreten kann. Die Kapillarrohrmatte muss in das Trägerelement des Chorgestühls eingelassen werden. Dazu wird eine Matte in speziell gefräste Nuten eingelegt. Trägerelement und Matte sind mit einem wärmeleitfähigen Kleber so zu verbinden, dass der Kleber die Nuten vollständig ausfüllt. Thermodynamisch ungünstige Luftpolster werden so minimiert. Das aus Trägerelement mit Kapillarrohrmatte bestehende Rückenteil muss folgende zusätzliche Funktionen übernehmen (Abb. 59):

- Aufnahme der Unterstation
- Aufnahme aller erforderlichen Verteilungrohrleitungen
- Aufnahme der gesamten Elektroinstallation u.a. für die Beleuchtung.

Der Wunsch der Schwestern, eine weitgehend gerade ebene Rückwand/Rückenlehne für das neue Chorgestühl zu realisieren, erscheint unter Beachtung der einzubringenden Technik von großem Vorteil.

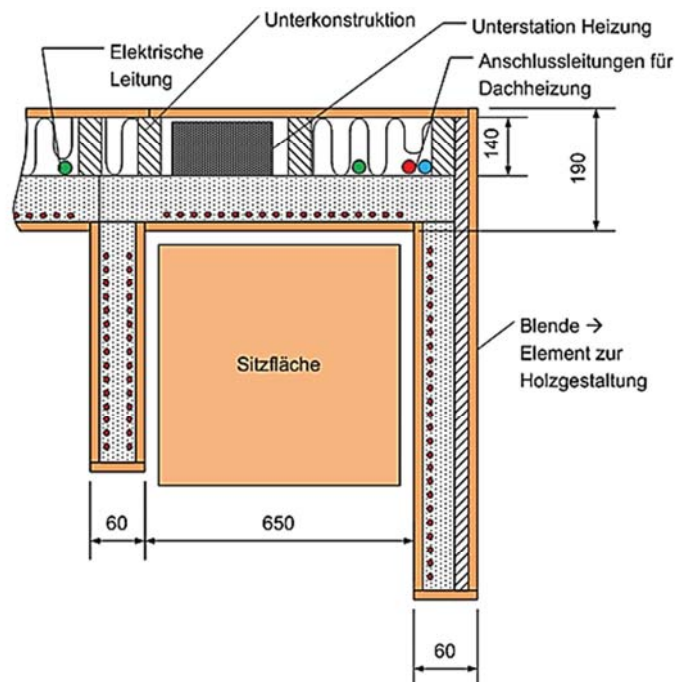


Abb. 59 Schnittansicht Chorgestühl  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Die Entwicklung der tragenden Konstruktion der Rückwand ist nicht Gegenstand der Untersuchungen und obliegt der beauftragten Tischlerei. Um den Energieverlust über die Rückwand zu minimieren, sollte diese wie auch die Rohrleitungen gedämmt werden. Nachstehend werden zwei schematische Abbildungen zum Aufbau der Rückwand vorgestellt (Abb. 60, Abb. 61). Die Darstellungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die angegebenen Maße sind Min-

destforderungen aus der Sicht der Heizungs-/Wärmetechnik. Spezielle Anforderungen aus der Sicht der Statik sind, wie oben bereits beschrieben, hier nicht berücksichtigt.

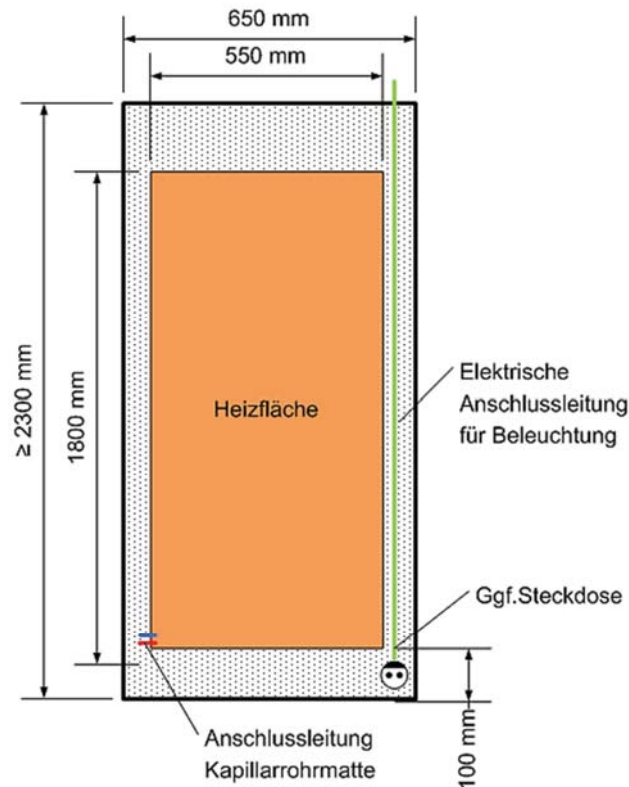


Abb. 60 Vorderansicht-Rückwand  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

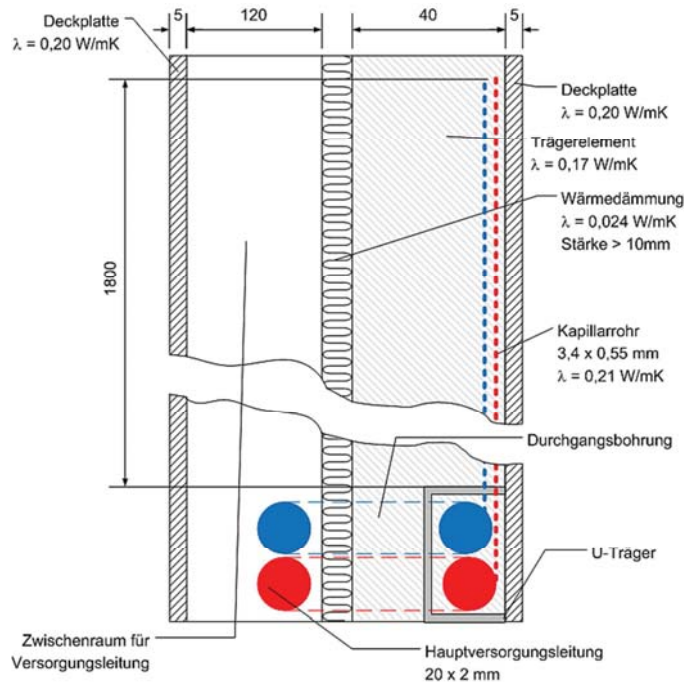


Abb. 61 Schnittansicht-Rückwand  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

## Entwurf Seitenwände

Generell ist zwischen den Chorwangen und den Zwischenwände zu unterscheiden. Die Chorwangen sind größer als die Zwischenwände und haben dementsprechend größere Heizflächen. Die von den Schwestern abgewandten Seiten (Außenseite der Chorwange) sind aus energetischen Gründen zu dämmen (Abb. 62).

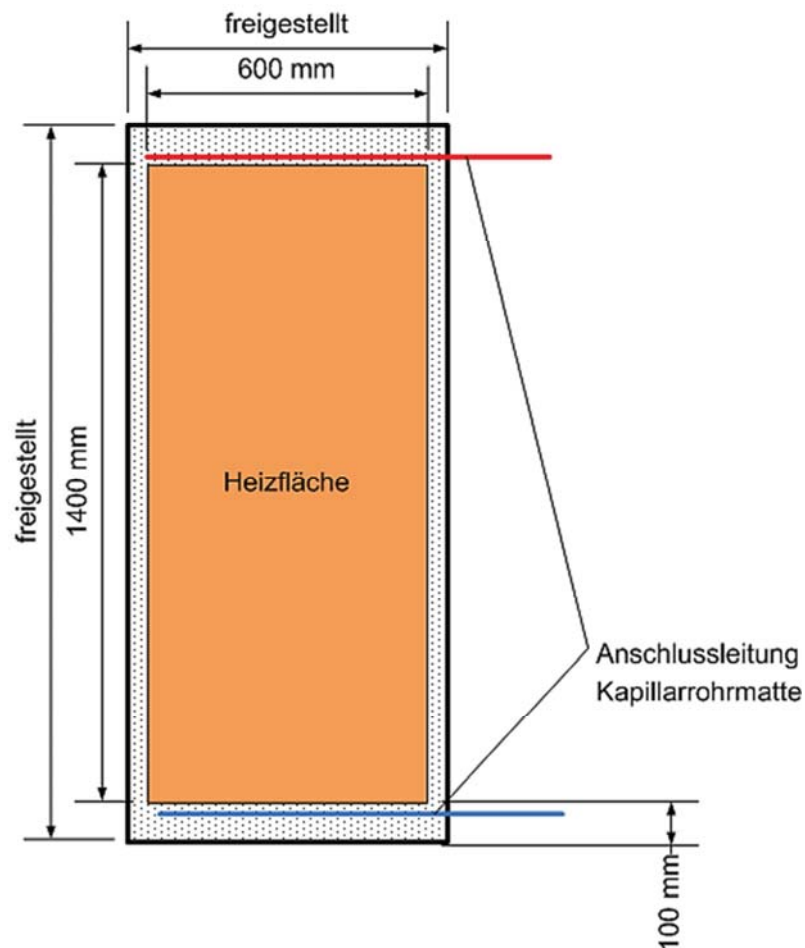


Abb. 62 Vorderansicht-Chorwange  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Zu beachten ist, dass die Skizzen nur den Ausschnitt der Heizungstechnik wiedergeben. Die freigestellten Maße sind, wie oben bereits mehrfach beschrieben, durch den Tischler/Holzgestalter vorzugeben (Abb. 63, Abb. 64).

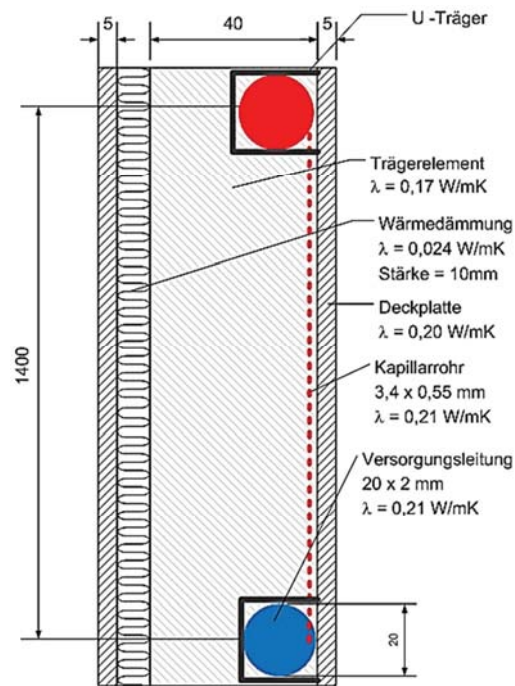


Abb. 63 Schnittansicht-Chorwange  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Die Zwischenwand (Trennwand zwischen den Plätzen der Schwestern) wird beidseitig mit einer Kapillarrohrmatte belegt. Damit soll eine gleichmäßige Erwärmung beider Seiten gewährleistet werden.

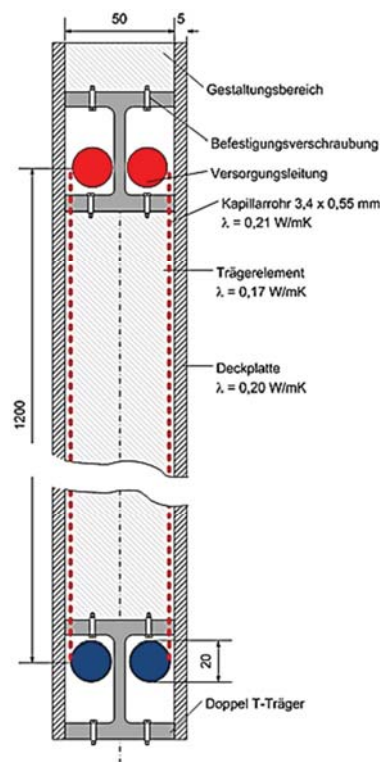


Abb. 64 Seitenansicht Seitenwand  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

## Entwurf Sitz

Eine direkte Beheizung der Sitzfläche erscheint dadurch problematisch, dass sich die Sitzfläche aus der horizontalen Stellung um 90 Grad in die Senkrechte klappen lässt. Ständige Bewegungen können wasserseitige Übergänge undicht aber auch Kabel (elektrische Sitzheizung) brechen lassen. In Verbindung mit der geforderten geraden Rückwand ist es möglich, den Sitz so anzuordnen, dass im hochgeklappten Zustand (Grundstellung) die Sitzfläche an der Rückwand bündig anliegt. In dieser Stellung wird der Sitz, wie in der Abb. 65 gezeigt, durch Strahlung und bei direktem Kontakt durch Leitung erwärmt. Die Oberfläche temperiert sich selbst.

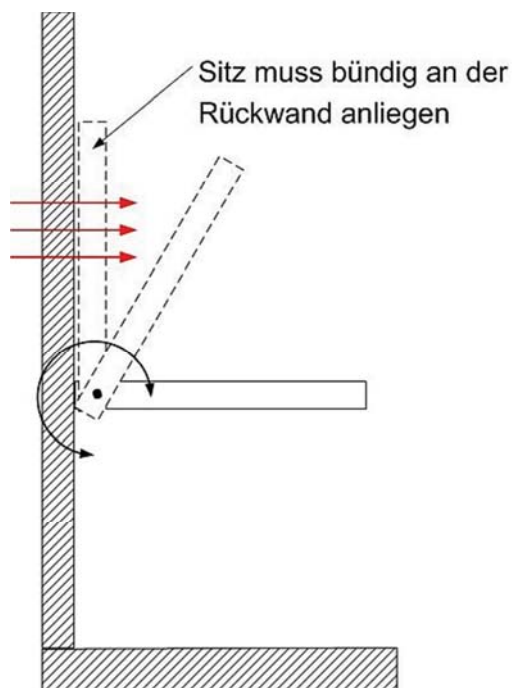


Abb. 65 Schnittansicht Sitzfläche  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

## Gesamtentwurf

Der in Abb. 66 dargestellte Gesamtentwurf gibt die prinzipielle Ansicht des Randbereichs als Teilmodul wieder. Darauf können die Gestaltungselemente aufgebaut werden. Auf Dach, Sitzfläche sowie Pult wurde aus Darstellungsgründen verzichtet. Ein Modul, welches als Zwischenstück Verwendung findet, besitzt zwei Zwischenwände. Die beheizten Flächen sind in dieser Darstellung rot gekennzeichnet.

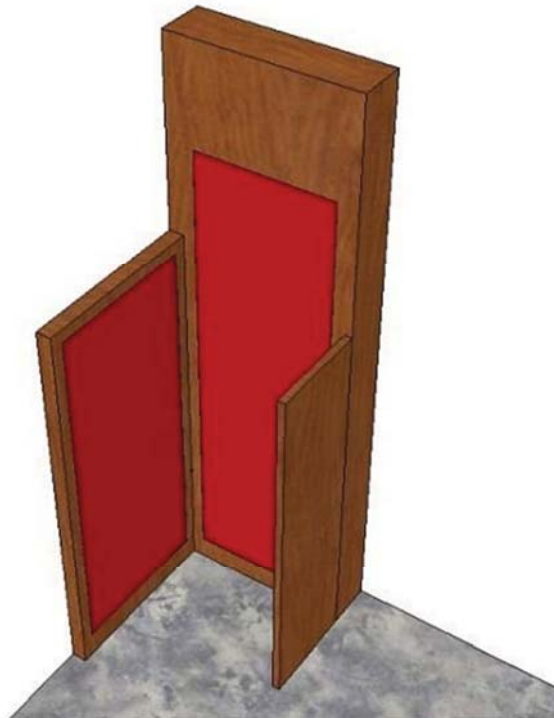


Abb. 66 Gesamtentwurf  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

### **Beseitigung von Schwachstellen**

Aufgrund der Erkenntnis aus dem Kapitel „Technische und wirtschaftliche Bewertung / 3-Zonenmodell“ muss für die Zone 3-3 (vgl. Abb. 48: 3-Zonenmodell / Zone 3) eine andere Lösungsmöglichkeit gefunden werden. Dabei bietet es sich an, den zweitplatzierten Lösungsvorschlag der technisch-wirtschaftlichen Bewertung zu nutzen. Die Luftschleieranlage muss den Bestimmungen der VDI 3817 genügen. Unter Beachtung der besonderen Situation des Chorgestühls im Kloster, wird empfohlen, den Raum für eine solche Anlage im Pult vorzusehen. Im Pult sollen daneben auch die Elektro- und Heizungsanschlüsse vorgesehen werden. Ein Überblick über die prinzipielle Lösung gibt Abb. 67. Mit einer auf die besondere Situation zugeschnittene „Luftschleieranlage“ sollte zunächst nur das rechte Chorgestühl ausgerüstet werden.



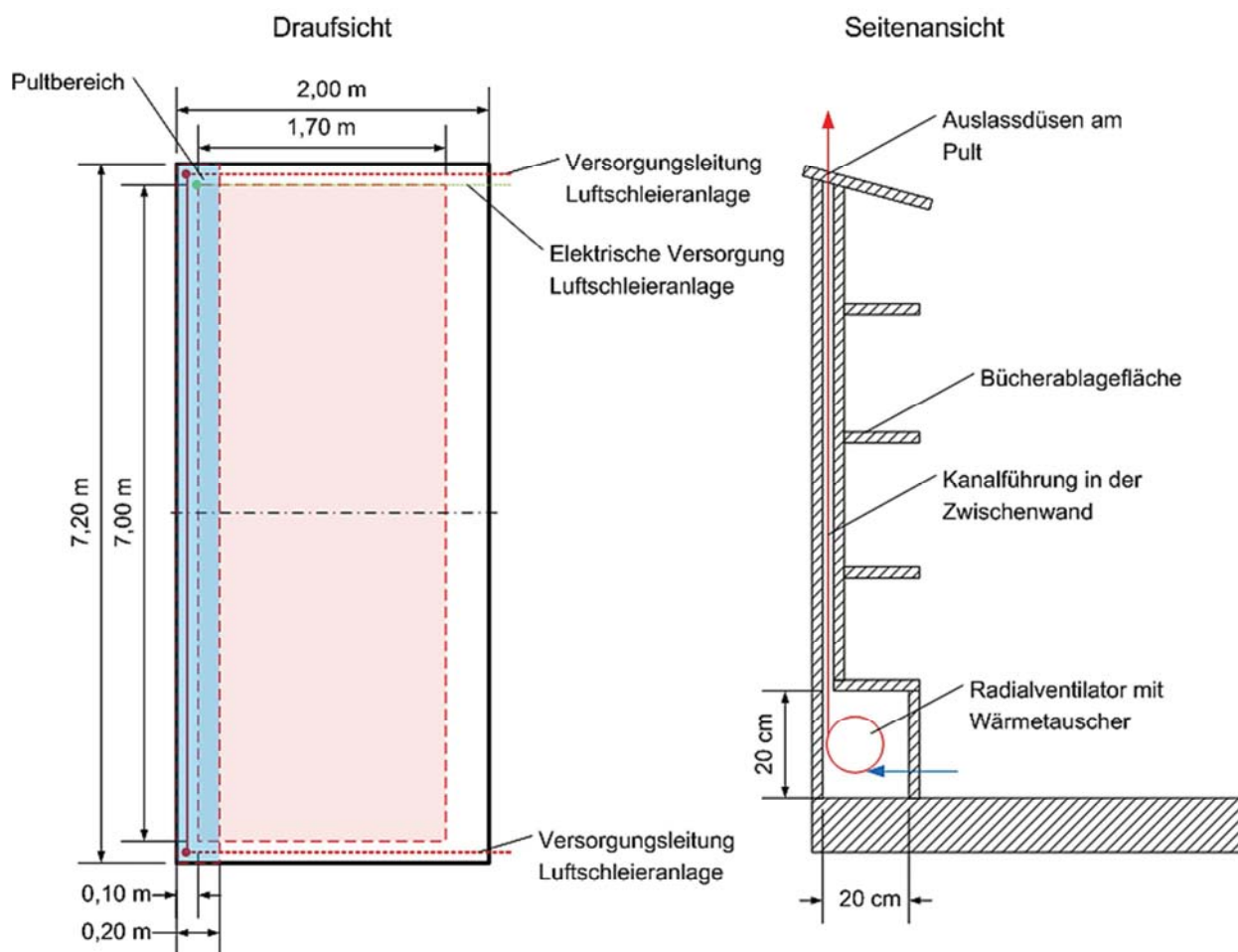


Abb. 67 Lage / Anordnung Luftschleieranlage  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Für eine zusätzliche unterstützende Maßnahme wird das Dach des linken Chorgestühls genutzt. Hierzu wird ein mit Heizmedium durchströmtes Rippenrohr über die gesamte Länge auf dem Dach installiert. Diese Streckenlast ist bei der Statik der Dachkonstruktion zu beachten. Aus ästhetischen Gründen muss das Dach so ausgebildet sein, dass das Rippenrohr nicht sichtbar ist, seine Funktion (Aufbau einer senkrechten Auftriebsströmung zur Veränderung der Richtung der kalten Strömung hervorgerufen durch die nordseitigen Fenster) aber trotzdem erfüllt. Im gestalterischen Vorschlag in Abb. 68 werden sichtbare Teile der Heizungsanlage durch die Anordnung von mehreren gotischen Bögen verdeckt. Durch den Betrieb des Rippenrohrheizkörpers (Abb. 68, rot markierter Bereich) wird die Kaltluftströmung von der Nordwand abgelenkt und trifft nicht auf das gegenüberliegende Gestühl auf. Die benötigte Anschlussleitung für das Rippenrohr kann in der Rückwand verlegt werden.

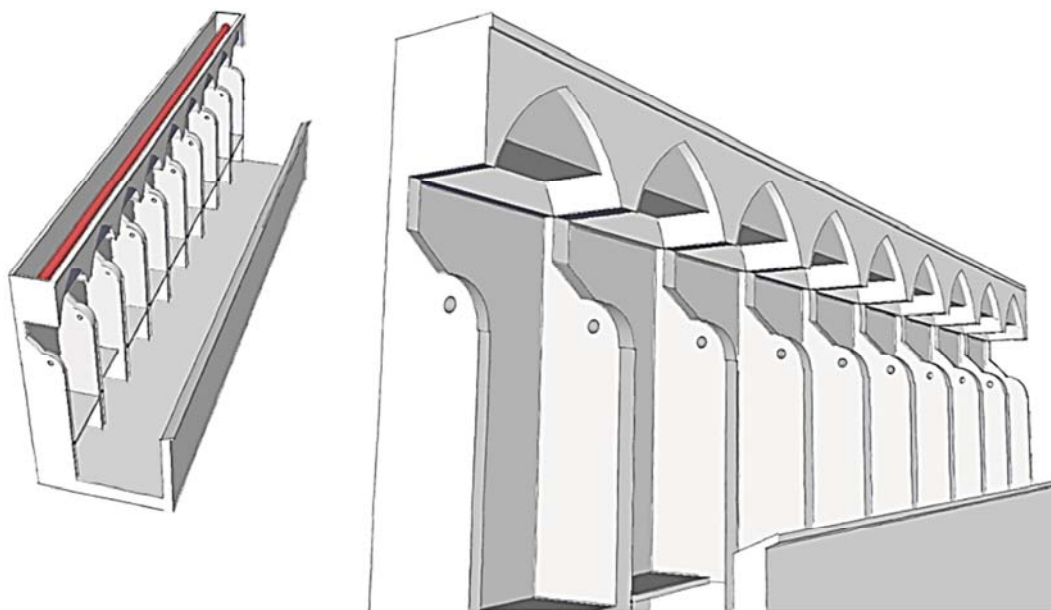


Abb. 68 Skizze der Dachkonstruktion mit gotischen Bogen  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Im Kapitel „Berechnung der Fußbodenheizung in der Kirche“ wird darauf hingewiesen, dass eine Fußbodenheizung zum Anheben von Luftströmungen führt. Daraus lässt sich ableiten, dass die vorhandene Fußbodenheizung im Altarbereich negative Auswirkung auf das Strömungsverhalten unmittelbar vor dem Chorgestühl hat (Abb. 69 und Abb. 70). Es ist zu erwarten, dass die Horizontalströmung in den Bereich des Chorgestühls eintritt und dort unerwünschte Effekte (Querströmungen) auslöst. Die Stilllegung dieser Fußbodenheizung wird empfohlen.

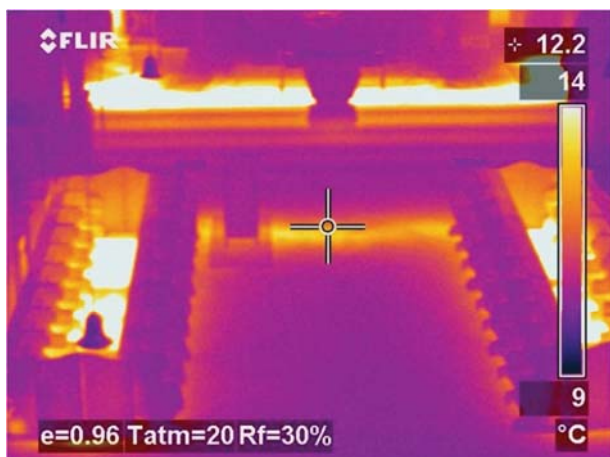


Abb. 69 IR-Aufnahme



Abb. 70 Realbild

Quelle für Abbildungen 4-38 und 4-39: Frei, Stefan (2011)

## Resultierende Gesamtlösung

In diesem abschließenden Kapitel soll die Gesamtanlage mit den Verbesserungsvorschlägen aus der Konzept- bzw. der Entwurfsphase vorgestellt werden. Aufbau des Chorgestühls sowie Aufbau der Heizungsanlage sind getrennt voneinander zu betrachten.

## Aufbau des Chorgestühls

Die aus den vorangegangenen Diskussionen und Darlegungen resultierenden notwendigen Veränderungen ergeben eine verbesserte Lösungsmatrix, die in Tabelle 20 dargestellt ist. Zone 2-1 sowie Zone 3-1 verfügen über keine aktiven Maßnahmen mehr.

Tabelle 20      Finale Lösungsmatrix 3-Zonenmodell / (\*) Linkes Chorgestühl(Nordwand): Dachheizung / Rechtes Chorgestühl(Südwand): ggf. Luftschleieranlage  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

zone Unterzone	Haupt- 1	2	3
1	Fußbodenheizung (Trockenaufbau)	-	-
2	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)
3	Bücherregal	Bücherregal	(*)
4	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)	Wandheizung (Kapillarrohr)

Für die weitere Vorgehensweise wurde dem Kloster St. Marienstern empfohlen, auf Grundlage der Angaben dieser Masterarbeit mit allen beteiligten Firmen ein Modul als Prototyp aufzubauen um dabei für das vollständige Chorgestühl weitere (wichtige) Erkenntnisse zu gewinnen. Als Begründung für diese Empfehlung soll folgender Sachverhalt dienen:

- Für die Verbindung der Kapillarrohrsysteme mit den Möbelspanplatten sind keine Erfahrungen vorhanden. Es gilt, einen geeigneten (Epoxidharz-) Kleber zu finden, der keine chemischen Reaktionen mit dem Basiswerkstoff der Matten „Polypropylen“ eingeht. Nach der Erstellung eines Prototyps und dessen Betrieb unter Realbedingungen (Heizung) können Veränderungen an den Trägerelemente wie auch an anderen Bauteilen festgestellt und anschließend mit geringem Kostenaufwand behoben werden.

Darüber hinaus kann mit den Schwestern des Klosters die Wirkung der gewählten Maße am realen Objekt überprüft werden. Da die äußere (optisch-künstlerische) Gestaltung zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht feststeht, kann am Modell die optimale Anordnung der Kapillarrohrmatten sowohl messtechnisch als auch durch die späteren Nutzer (Probanden, Schwestern) untersucht werden. Es wird an dieser Stelle noch einmal darauf verwiesen, dass alle bisherigen Betrachtungen auf einer vertikalen Anordnung der Kapillarrohrmatten basieren. Sollten sich bei der Erarbeitung der Statik des Chorgestühls Probleme einstellen, wäre eine horizontale Anordnung der Kapillarrohrmatten eine Beheizungsvariante, die wiederum mit allen beteiligten Gewerken zu diskutieren wäre. (Abb. 71). Weiterhin müssen Punkte wie Statik und Materialfestigkeit genauer untersucht werden. Mit dieser Vorgehensweise kann das Fehlerrisiko gesenkt und eine Fertigungs-, Montage- und Betriebsvorschrift erarbeitet werden.

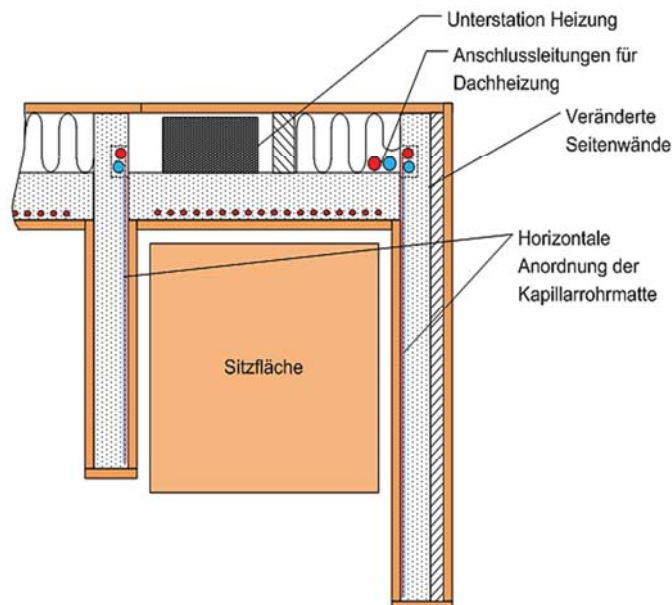


Abb. 71 Änderung der Anordnung (horizontale Kapillarrohrmatte)  
Quelle für Abbildung 4-40 und 4-16): Frei, Stefan (2011)

Nicht zuletzt kann mit diesem Versuchsaufbau die zum Zeitpunkt der vorliegenden Untersuchungen noch strittige Beleuchtung (Art und Stärke) sowie die Anordnung von Schaltern, Steckdose u. dgl. Mehr mit den späteren Nutzern beraten und festgelegt werden.

### Aufbau der hydraulischen Anlage

Das Ziel des Gesamtkonzeptes ist ein minimaler Energieverbrauch. Im Zusammenspiel zwischen oberflächennaher Wandheizung (Kapillarrohrmatten; Strahlungsheizung), Fußbodenheizung und einem modernen Regelungskonzept wird dies erreicht. Die beiden Systeme sollten über einen geeigneten Wärmeübertrager vom übrigen Heiznetz des Klosters getrennt werden (vgl. Kapitel „Entwurf Rückwand“). Unabhängig von den erhöhten Investitionskosten durch Wärmeübertrager, Ausdehnungsgefäß und Sicherheitstechnik kommen folgende Vorteile zum Tragen:

- Die Beheizung des Chorgestühls ist hydraulisch vollständig vom Heiznetz getrennt.
- Im Heiznetz des Klosters zirkulierende Schmutzpartikel gelangen nicht in die Kapillarrohrmatten. Die Gefahr von Verstopfungen ist gebannt.
- Schwankende Druckverhältnisse im Heiznetz des Klosters wirken sich nicht auf die sensible Technik der Beheizung des Chorgestühls aus.
- Die im Fall einer Havarie im Bereich des Chorgestühls austretende Wassermenge ist begrenzt und gering.

An dieser Stelle muss nicht besonders erwähnt werden, dass alle Rohrleitungen im Chorgestühl und zur Anbindung der beiden Chorgestühle mindestens nach den aktuell gültigen Vorschriften mit Wärmedämmung zu versehen sind. Vor dem Hintergrund einer für das Chorgestühl konstanten Vorlauftemperatur wird dringend empfohlen, die Rohrleitungen im Kreuzgang nachträglich ebenfalls mit Wärmedämmung zu ummanteln.

In Abb. 72 ist das Hydraulikschema des linken Chorgestühls dargestellt. Die einzelnen Heizzonen werden durch die Strich-Punkt-Linie dargestellt. Nicht nur zwischen den Kapillarrohrmatten sondern im gesamten System einer Seite des Chorgestühls muss durch den Installateur ein

hydraulischer Abgleich durchgeführt werden. Nur so ist ein gleichmäßiges Erwärmen der Flächen zu garantieren.

Die Regelung erfolgt mittels Zeitsteuerung (für eine intermittierende Beheizung). Darüber hinaus ist die Heizung über den Sollwert (ggf. zulässigen Maximalwert) der Oberflächentemperatur zu regeln, wobei die Temperaturen von Fußboden und Rückwand getrennt zu erfassen sind. Werden am Chorgestühl Temperaturen unter 4 °C festgestellt, ist eine Frostschutzschaltung zu aktivieren. Ein alternativ zu installierender Wärmemengenzähler soll dem Kloster ermöglichen, den Verbrauch zu kontrollieren und zu dokumentieren.

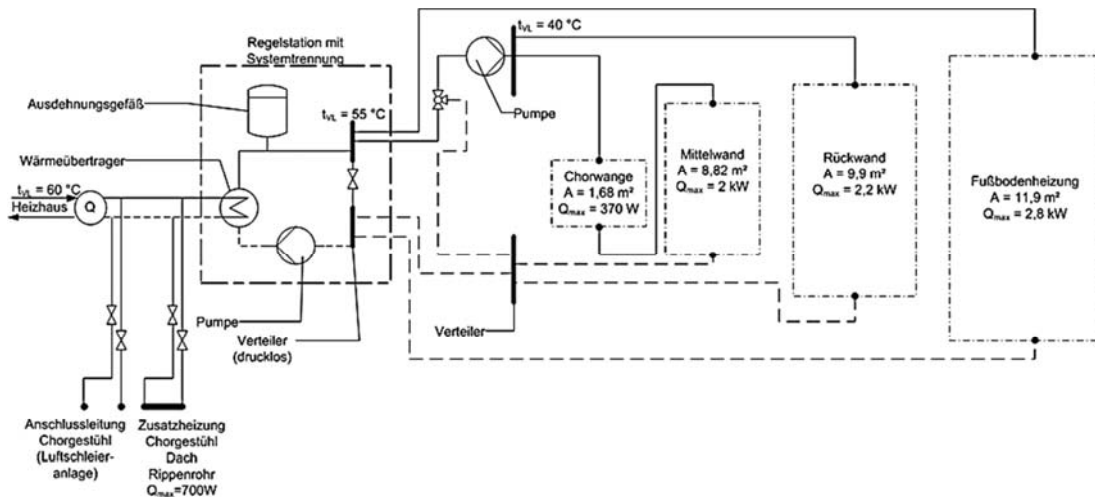


Abb. 72 Hydraulikschema des linken Chorgestühls (Nordwand)  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Abb. 72 zeigt außerdem, dass die Zusatzheizung vor der Regelstation eingebunden ist. Die Einstellung der Durchflussmenge erfolgt manuell mittels Regulierventil. Dies muss, wie auch alle anderen Bauteile der Regelung und Systemtrennung, leicht erreichbar sein (ggf. hinter einer Revisionsklappe im Chorgestühl). In Abb. 73 ist das Hydraulikschema des rechten Chorgestühls dargestellt, der gegenüber dem linken Chorgestühl nur über eine „ungeregelte“ Anschlussleitung für die „Luftschleieranlage“ im Chorgestühl verfügt.

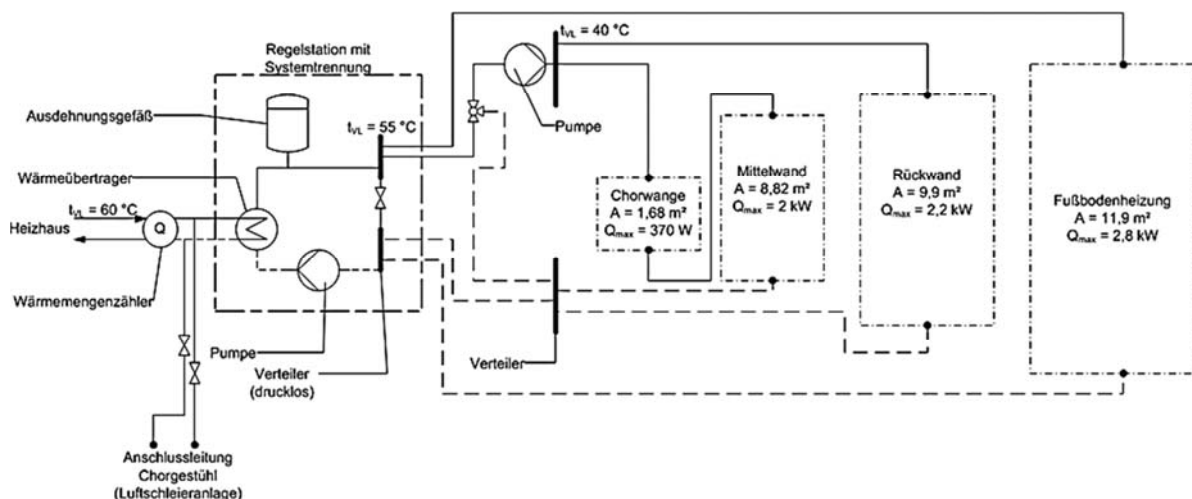


Abb. 73 Hydraulikschema des rechten Chorgestühls (Südwand)  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Für die Auslegung der Anlage stellen die Werte aus Tabelle 4 9 die Grundlage dar.

Tabelle 21 Übersicht Kennwerte von einem Chorgestühl  
\* Bei max. Wärmeleistung wird max. Vorlauftemperatur und nur in der kältesten Raumsituation gefahren.  
Quelle: Frei, Stefan (2011)

Bezeichnung	Rückwand	Mittelwand	Chorwange	FBH (Diele)	FBH (Granit)
Anzahl der Flächen	10	18	2	1	1
Gesamte Registerlänge [m]	990	882	168	95,2	95,2
Max. Wärmestromdichte [W/m <sup>2</sup> ]	224	225	220	237	170
Max. Wärmeleistung [W]*	2260	1700	430	2997	2172
Wärmeleistung (T <sub>w</sub> =25 °C)	1733	1303	330	2606	2172
Breite Fläche [m]	0,55	0,35	0,60	1,70	1,70
Länge Fläche [m]	1,80	1,20	1,40	7	7
Max. Vorlauftemperatur [°C]	40	40	40	55	40
Spreizung [K]*	4,2	4,1	4,9	10,6	7,7
Registerabstand [mm]	10	10	10	125	125
Massestrom [m <sup>3</sup> /h]	0,462	0,356	0,075	0,243	0,242

Neben den bereits formulierten Nachteilen stellt die große Spreizung bei der FBH, Variante „Diele“, ein weiteres Problem dar.

Im normalen Betrieb benötigen beide Chorgestühle (mit Granitfußboden) eine Wärmeleistung von  $\dot{Q}_{ges} \approx 11kW$ . Verbunden mit einer Betriebsdauer von 4 Stunden täglich und 180 Tagen im Jahr wird ein Wärmebedarf von  $Q = 7975kWh/a$  vorausberechnet. Die vollständig beheizte Kirche würde unter sonst gleichen Bedingungen (Raumtemperatur 20 °C) einen Wärmebedarf von  $Q = 331,5MWh/a$  [IDK e.V. (2009)] aufweisen. Ausgehend vom Heizwärmebedarf für die Grundtemperierung der Kirche ( $Q = 58,1MWh/a$ ; Raumtemperatur 8 °C) und ohne Betrachtung der Bankheizung für die Besucher werden durch die lokale Temperierung im Chorgestühl ~80 % der jährlich benötigten Wärmemenge eingespart. Diese entspricht einer Einsparsumme von rund 26.550 €.

### 9.5 Darstellung Oberflächentemperaturen und Wirkprinzip des neuen Chorgestühls durch IR-Thermographie

Anhand von angefertigten Thermographieaufnahmen können die einzelnen Wirkbereiche des neuen Chorgestühls und dessen konstruktiver Aufbau visualisiert werden. Erkennbar werden die einzelnen Heizflächen im Fußboden, Rückwand, Seitenwände und Dachbereich. Den Thermographieaufnahmen werden Lichtbildaufnahmen zur Orientierung beiseite gestellt (Abb. 74 bis Abb. 76).

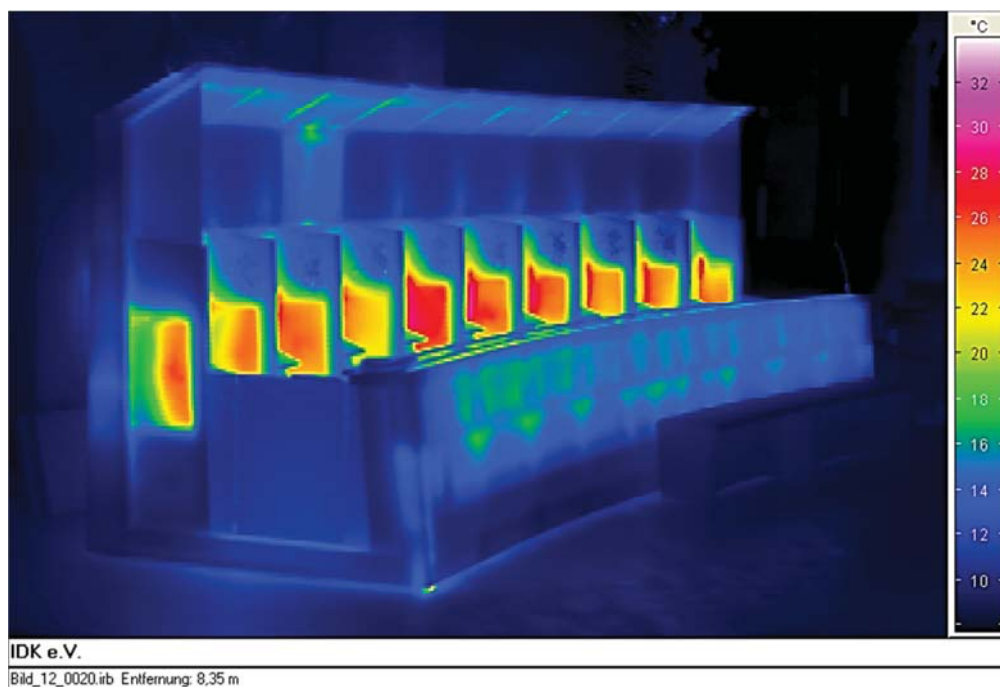


Abb. 74 Thermographieaufnahmen Chorgestühl / Gesamtaufnahme  
Quelle: IDK e.V.

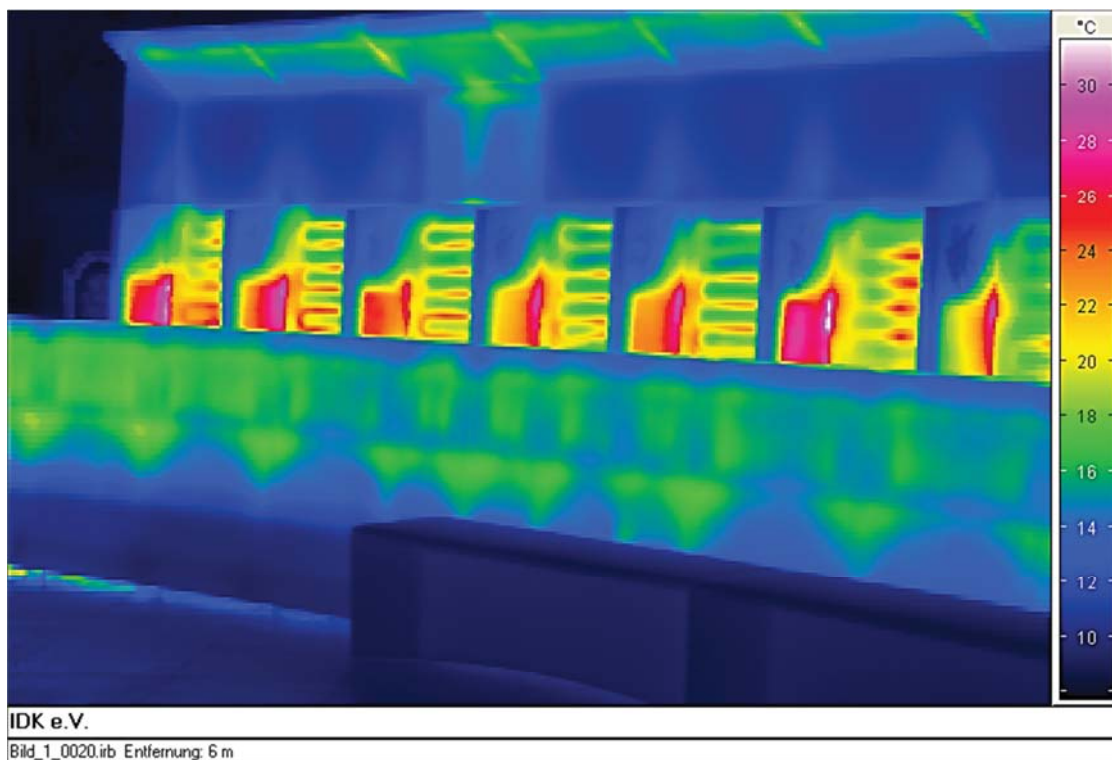


Abb. 75 Thermographieaufnahmen Chorgestühl / Vorderseite  
Quelle: IDK e.V.



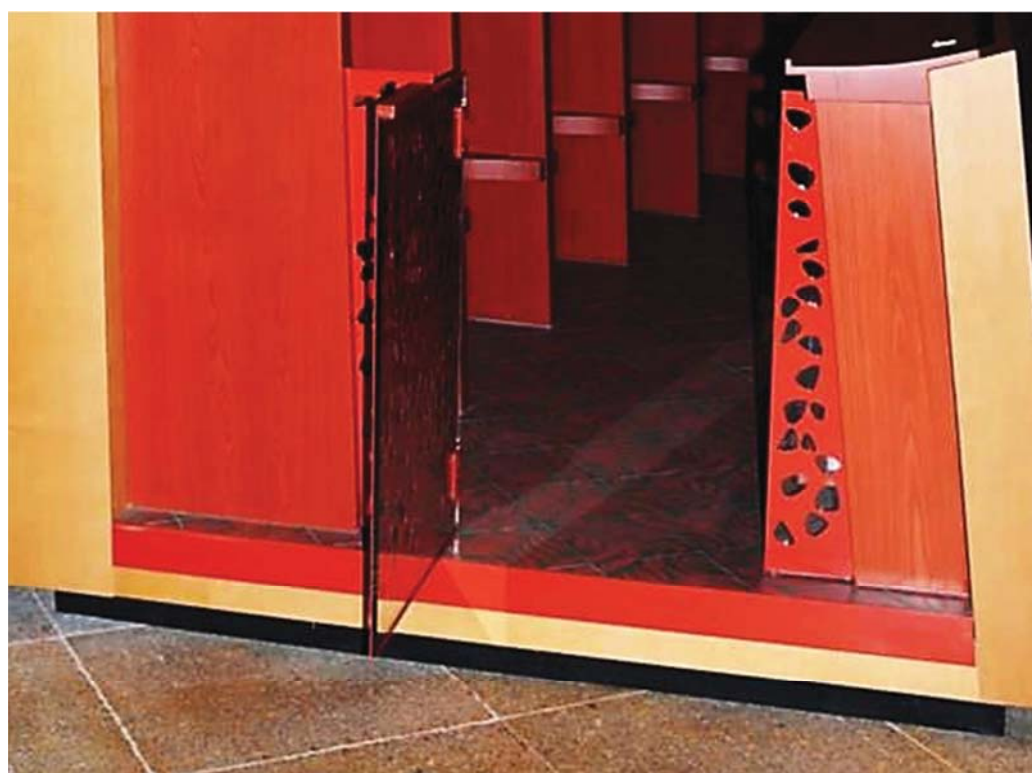
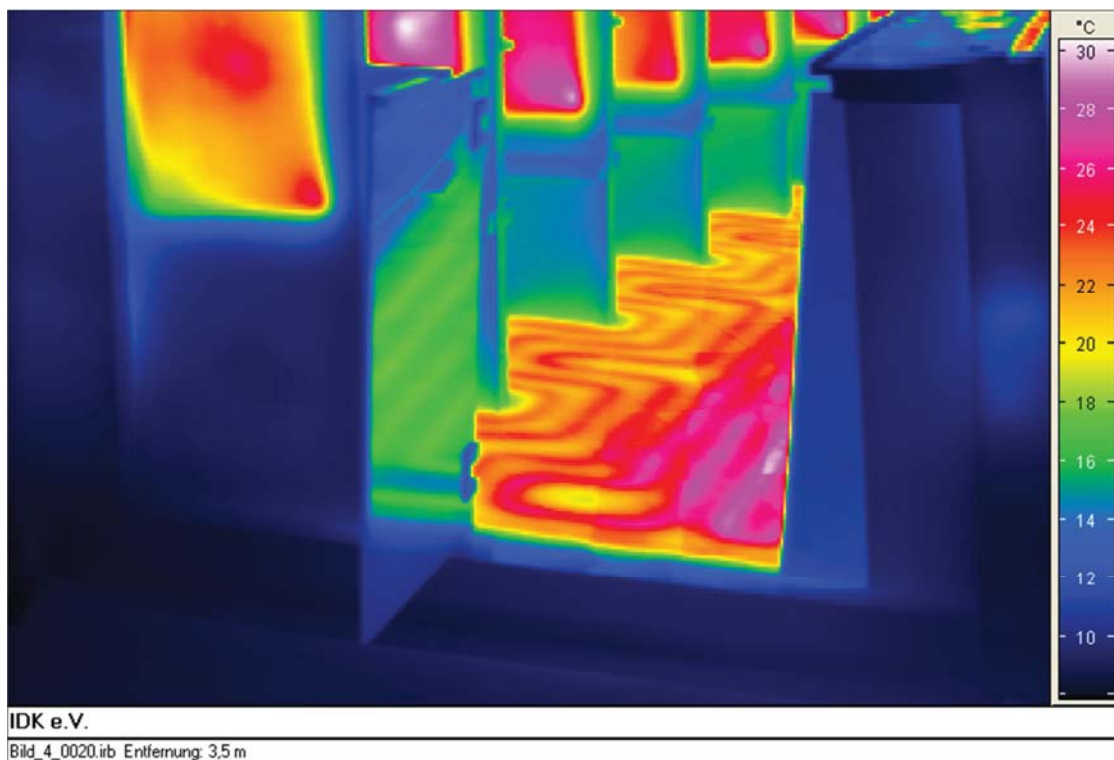


Abb. 76 Thermographieaufnahmen Chorgestühl / Fußbodenbereich  
Quelle: IDK e.V.

## 9.6 Bildliche Abfolge der Planung des Chorgestühls

Im Folgenden soll grafisch versucht werden dem Leser die Entwicklungsprozesse am Chorgestühl zu vermitteln. Die Zeitspanne der Aufnahmen reicht von 2007 bis 2016.



Abb. 77 Chorgestühl im Ausgangszustand (2007)  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 78 Chorgestühl mit temporärer Schutzrückwand gegen Kaltluftströme (2008)  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 79 Chorgestühl mit einer Visualisierung einer temporärer Schutzrückwand gegen Kaltluftströme (2008)  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 80 Musterchorgestühl mit temporären Wänden bei Versuchen zur Luftströmungserfassung bei Rauchversuchen (2008)  
Quelle: IDK e.V.



Abb. 81 neues Chorgestühl (2014)  
Quelle: Kloster St. Marienstern



Abb. 82 neues Chorgestühl (2014)  
Quelle: Kloster St. Marienstern

## 10 Visueller Vergleich von Luftströmungen im Kirchenraum zur Voruntersuchung

### 10.1 Einführung

Im Verlauf der Luftströmungsmessungen im Vorprojekt 2007 - 2008 konnten aufschlussreiche Messergebnisse für den damaligen Zustand der Kirchenheizung gesammelt werden. So wurden zum Beispiel 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. Nach dem Umbau der Kirchenheizung und der Anbringung der Windschottsysteme an den Nordfenstern stellen sich andere Luftströmungen in der Heizperiode im Kirchenschiff ein (siehe Kapitel 8.9 Windschottsysteme für die Klosterkirche St. Marienstern). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Luftströmungsmessung der Voruntersuchung 2007 - 2008 im Kirchenschiff erläutert, visualisiert und mit den Untersuchungen aus den Jahren 2011 - 2012 verglichen.

Deutlich wurde bei allen Untersuchungen, dass ein Zusammenhang zwischen zunehmender Luftbewegung und Differenz zwischen Außen- und Innenlufttemperatur an den Fensterflächen besteht. Bei einer Annäherung von Außen- und Innenlufttemperatur kommt es zu einer deutlichen Abschwächung der Fallwinde. Bei einer Vergrößerung der Temperaturdifferenz steigt jedoch die Luftbewegung wieder an und ist im Kirchenraum als Zugluft spürbar. Auffällig an den Messungen sind die Messzeiten an Sonntagen, an denen die Raumlufttemperatur leicht zunahm, gleichzeitig aber auch die Luftbewegung am Chorgestühl auf bis zu 0,3 m/s anstieg. Der gemessene Temperaturanstieg kann mit der hohen Anzahl an Gottesdienstbesuchern (ca. 300 Personen in fünf Stunden) erklärt werden. Also auch die Besucher sorgen mit ihrer Wärmeabgabe für eine spürbare Veränderung des Raumklimas, welche als unangenehme Zugluft spürbar wird.

Um die Luftbewegung in der Klosterkirche zu visualisieren, erfolgten zu unterschiedlichen Jahreszeiten Rauchversuche mit unterschiedlichen Raucherzeugern. An mehreren Tagen erfolgten kleine Rauchversuche mit Rauchstäbchen oder kleineren Rauchgeräten. Mit dieser Technik 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 Rauchversuche mit größeren 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 folgenden Grafiken in der die wesentlichen Beobachtungen eingezeichnet sind. Die roten Pfeile stehen für aufsteigende Warmluftbewegung und die blauen Pfeile für fallende Kaltluftbewegung. Es lässt sich feststellen, dass es bei der Vor- und der Nachuntersuchung 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 Nord-Ost-Ecke bzw. der allgemein kühleren Nordwand und der aufsteigenden Warmluft, ausgehend von den unterschiedlich im Raum angeordneten Wärmeabgabepunkten. Die seitlichen abwärts oder aufwärts gerichteten Luftbewegungen sorgen vor allem an den Fensterflächen und den Heizkörpern für eine Verstärkung oder eine Abschwächung der Zegerscheinungen. Durch diese Verwirbelung der Raumluft kommt es aber in der Heizperiode nur zu einer minimalen Schichtung der Raumlufttemperaturen im Kirchenschiff. Dies konnte durch begleitende Raumklimamessungen bestätigt werden.

Anhand der folgenden Grafiken (Abb. 83 bis Abb. 86) kann erkannt werden, dass es durch die erfolgten Umbaumaßnahmen an der Kirchenheizung zu Verbesserungen an der Zuglufterscheinung in der Klosterkirche gekommen ist. Dies ergaben die Rauchversuche aber auch punktuelle Messungen der Luftbewegung. Dennoch stellen sich in der Klosterkirche keine gleichmäßig positiv verteilten raumklimatischen Zustände ein. Dafür sind solche komplexe Raumsysteme zu kompliziert, um sie durch ein paar wenige bauliche Eingriffe zu stabilisieren. Ein Abwägen zwischen einer gewollten Behaglichkeit in allen Raumbereichen, energetischen und denkmalpflegerischen Anforderungen und finanziellen Möglichkeiten muss immer berücksichtigt werden.

Die Stärke der Pfeile in den folgenden Grafiken sollen die erfassten Zugluftstärken und Richtungen verdeutlichen. Im Vergleich zur Voruntersuchung, konnten Verbesserungen messtechnisch und durch die Rauchversuche eindeutig erfasst werden.

## 10.2 Luftströmungen Voruntersuchung 2007 - 2008

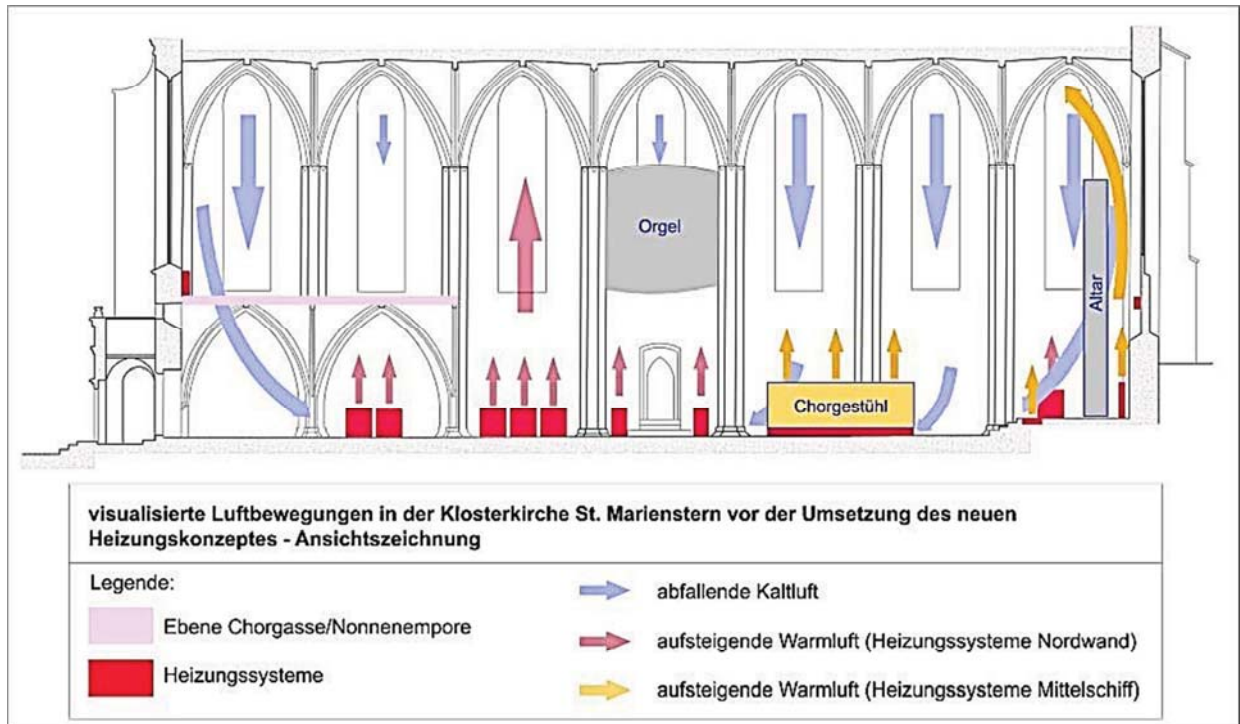


Abb. 83 Schematische Darstellung der Zuglufterscheinungen im Längsschnitt / Voruntersuchung 2007 – 2008  
Quelle: IDK e.V.

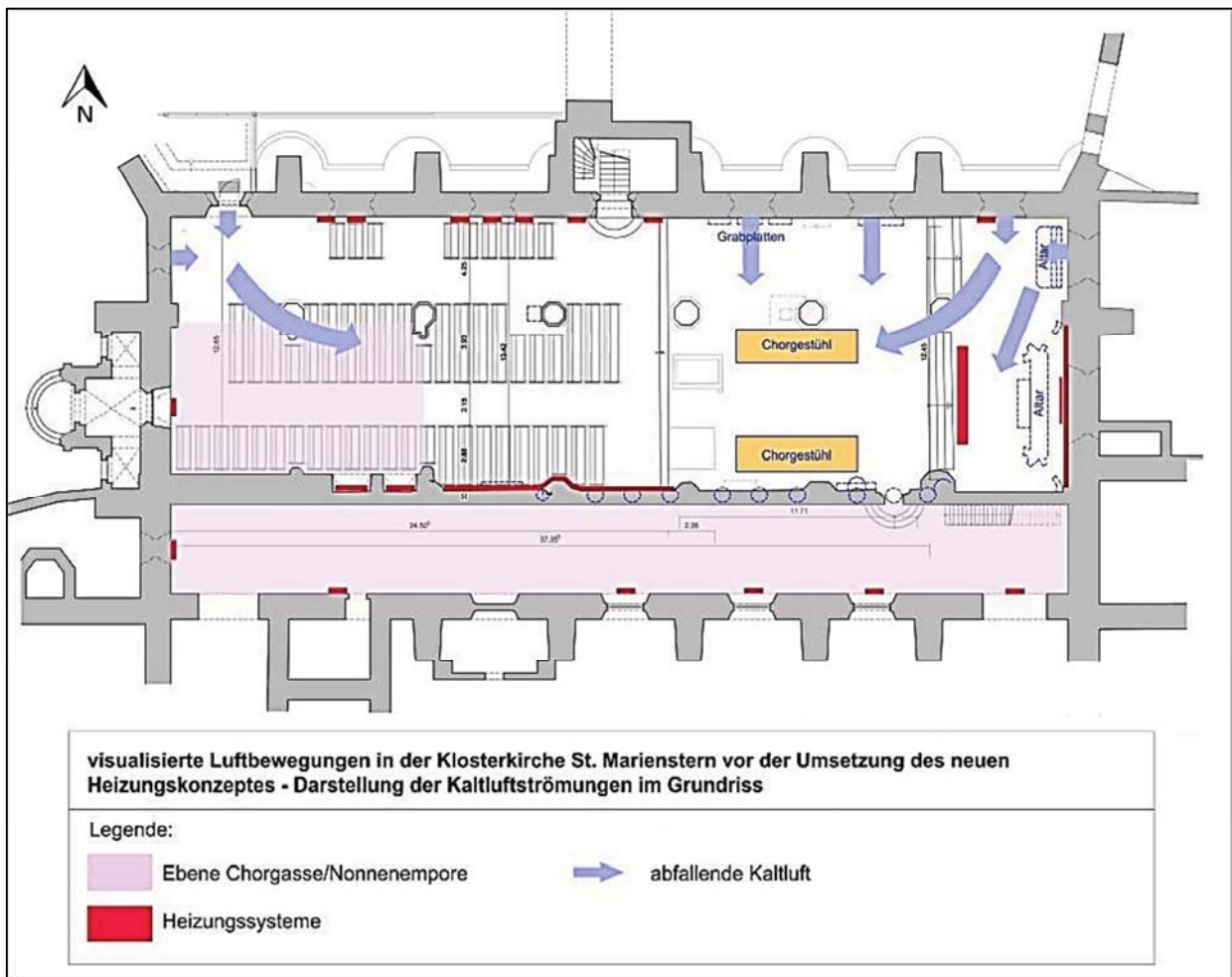


Abb. 84 Schematische Darstellung der Zuglufterscheinungen im Grundriss / Voruntersuchung 2007 – 2008  
Quelle: IDK e.V.

### 10.3 Luftströmungen Nachuntersuchung 2010 - 2012

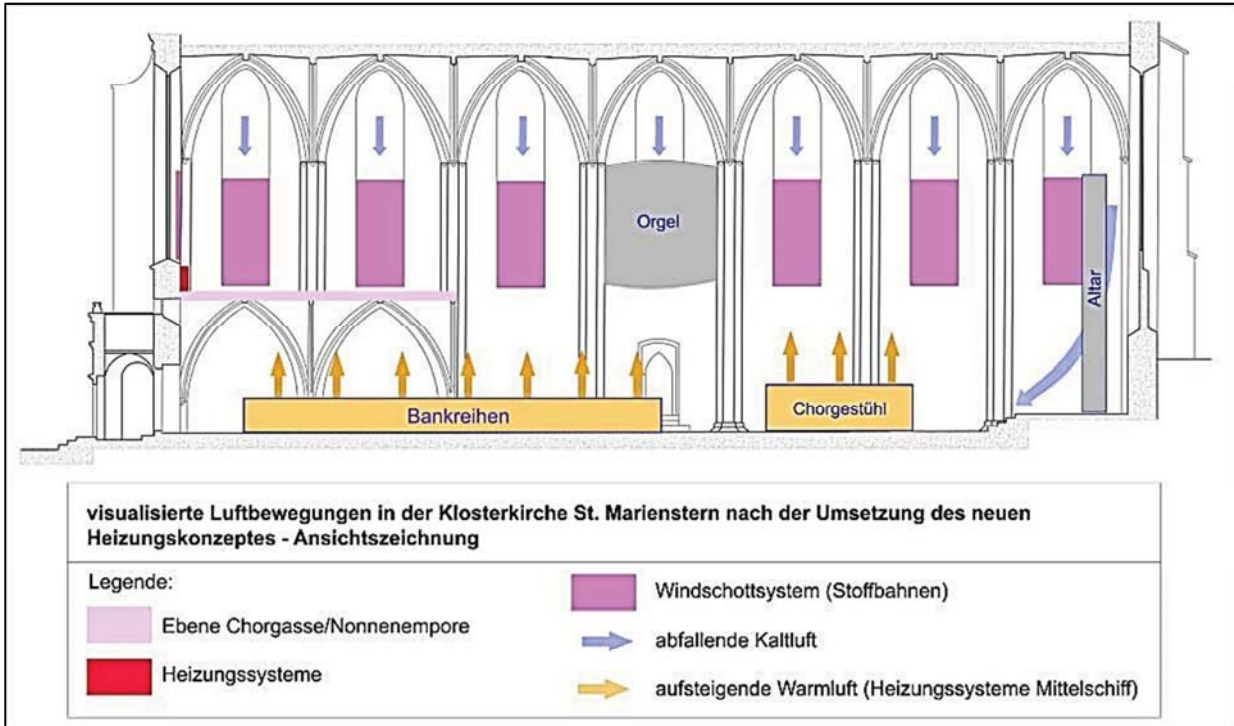


Abb. 85 Schematische Darstellung der Zuglufterscheinungen im Längsschnitt / Nachuntersuchung 2010 - 2012  
Quelle: IDK e.V.

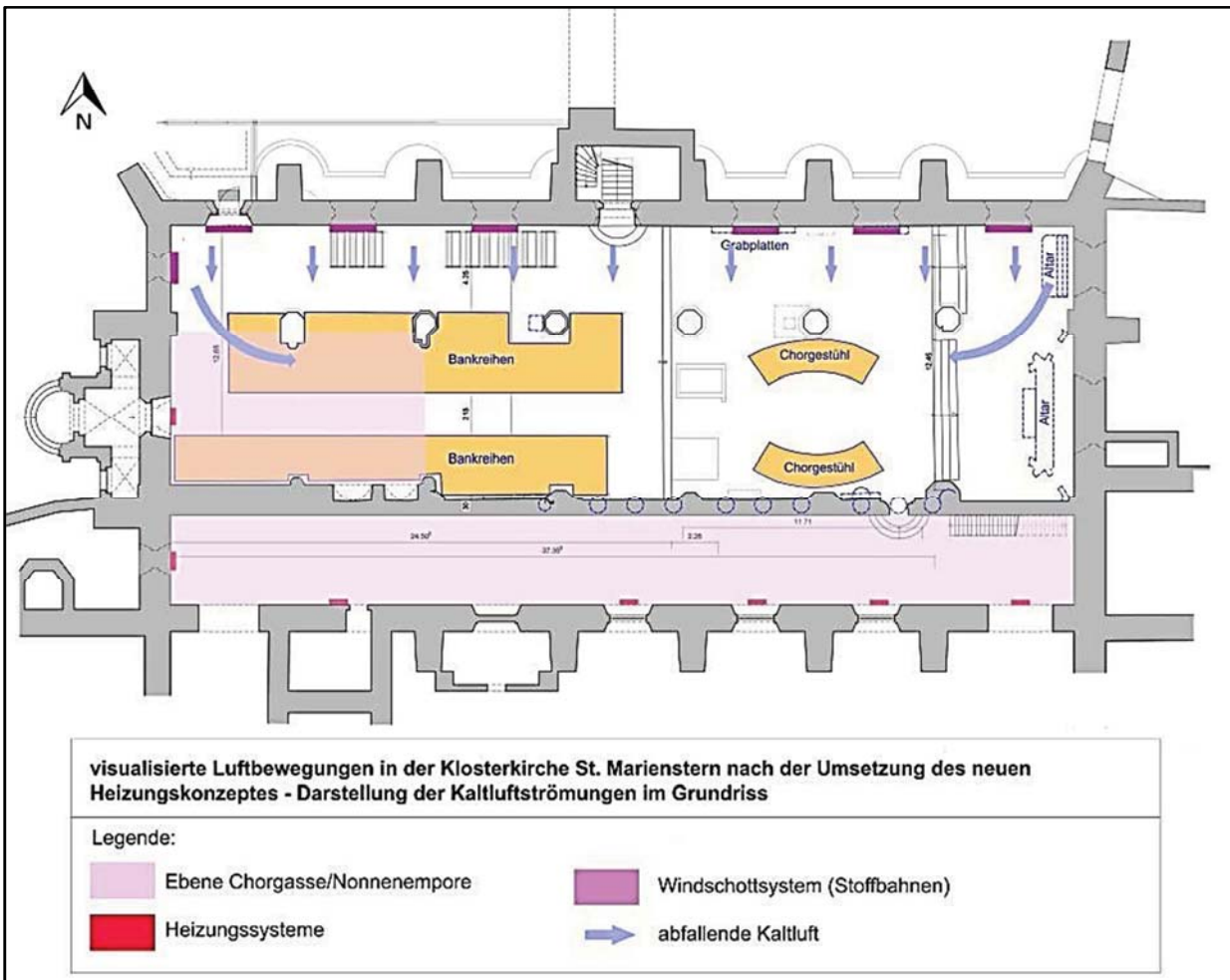


Abb. 86 Schematische Darstellung der Zuglufterscheinungen im Grundriss / Nachuntersuchung 2010 - 2012  
Quelle: IDK e.V.



## 11 Auswirkung einer Gewölbedämmung auf die erneute Verschmutzung der Oberfläche

Nach der vorangegangenen Renovierung der Klosterkirche im Jahre 1998 wurde eine schnell zunehmende erneute Vergrauungen der ehemals weiß beschichteten Gewölbeunterseite festgestellt. Da als Ursache eine zu geringe Oberflächentemperatur der Gewölbeunterseite im Winter in Frage kommt, bot sich als Gegenmaßnahme die dachbodenseitige Dämmung des Gewölbes an. Damit könnten neben einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Gewölbeunterseite im Winter auch die winterlichen Wärmeverluste der im Vergleich zu den Kirchenwänden sehr dünnen Gewölbeschale verringert werden. Dazu wurden probeweise zwei Gewölbefelder der Kirche mit einer ca. 10 cm starken Zellosoeschicht fugenlos gedämmt und messtechnisch untersucht (Abb. 87, Abb. 88).

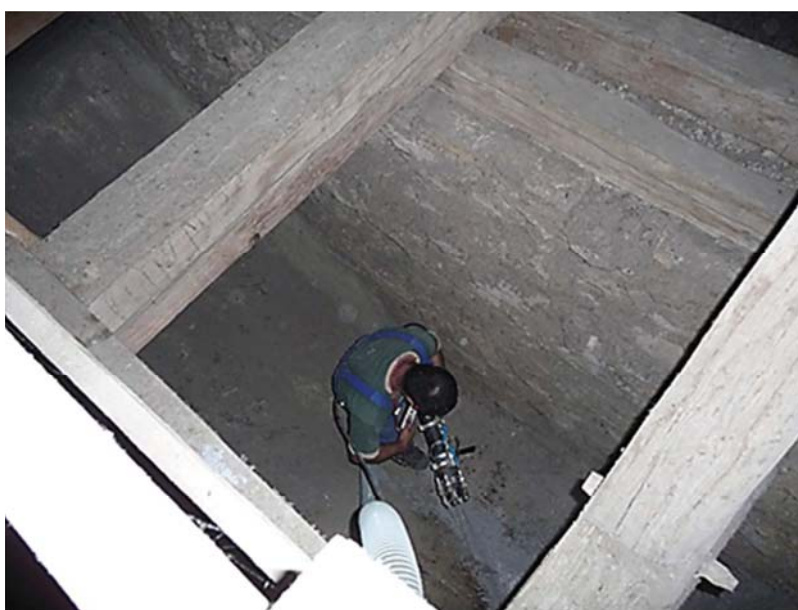


Abb. 87 Aufbringen von Isoflock als oberseitige Gewölbedämmung  
Quelle: Kloster St. Marienstern



Abb. 88 Oberer Kirchgang mit Kennzeichnung der Messgewölbe; (23.02.2011)  
Quelle: N. Lange

Die im Folgenden beschriebenen Messungen sollen Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der nachträglichen Dämmung bezüglich einer erneuten Vergrauungen der Gewölbeunterseiten ermöglichen.

### 11.1 Darstellung Oberflächentemperaturen durch IR-Thermographie

Anhand von angefertigten Thermographieaufnahmen kann bereits eine thermische Veränderung der Oberflächentemperatur an der Gewölbeunterseite erkannt werden. Die gedämmten Flächen zeigten am Untersuchungstag eine ca. 1 K hohe Oberflächentemperatur (Abb. 89).

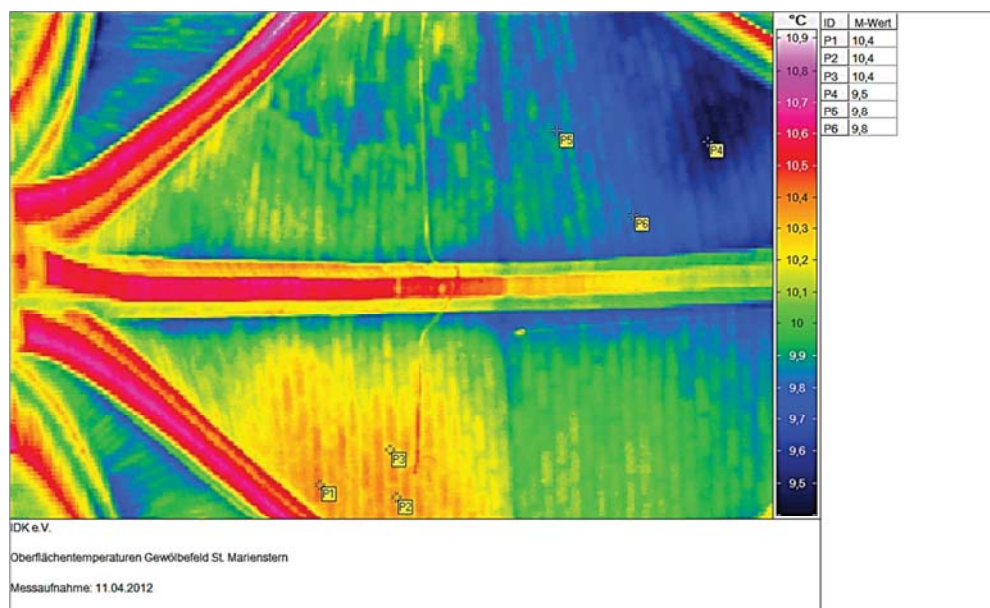


Abb. 89 Vergleich der Oberflächentemperaturen von gedämmten (unten) und ungedämmten (oben) Gewölbereichen

Quelle: IDK e.V.

## 11.2 Messgerät zur Farbmessung, Messmethode

Für die Farbmessung kam das Farbmessgerät "spectro-guide sphere gloss" der "Firma BYK-Gardner GmbH" zum Einsatz. Es ist in der Lage, aufgelöst auf 31 Frequenzbereiche in 10 nm-Schritten, den sichtbaren Bereich des Lichtes mit einer Wellenlänge von 400 nm bis 700 nm aufzunehmen und im Farbsystem "CIE L\*a\*b\*" abzubilden. Die besondere Qualität des Messgerätes besteht in seiner Handlichkeit am Einsatzort und seiner Messwertstabilität. Mitgelieferte Farbproben lassen eine schnell Kalibrierung vor Ort zu. Die Messungen erfolgten an vorher gekennzeichneten Messpunkten, jeweils mit mehreren Messungen je Messpunkt und Messtermin. Die Messung mit der "sphere"-Geometrie (Kugelbeleuchtung) ermöglicht eine Farbbeurteilung weitestgehend unabhängig von der geometrischen Struktur der Messoberfläche. Das Messgerät benutzt als Lichtquelle D65/10° (also ein Normallicht nach ISO 3664 mit der Farbtemperatur von 6504 K und einem Einfallswinkel von 10°).

### Der L\*a\*b\* - Farbraum

Der CIE L\*a\*b\*-Farbraum definiert Farben geräteunabhängig und wahrnehmungsbezogen und basiert auf der Gegenfarbtheorie. Gleiche Farbabstände  $\Delta E$  werden vom menschlichen Auge als gleich empfunden. Grundlage ist ein Standardlicht und ein Standardbeobachter.

L: Luminanz- oder Helligkeitskomponente; Zahl von 0 (schwarz) bis 100 (weiß)

a: grün/rot - Komponente; grün (-180) bis rot (+180)

b: blau/gelb - Komponente; blau (-180) bis gelb (+180)

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Bedingungen zur Beurteilung von Unterschieden für  $\Delta E$ :

<0,2	nicht sichtbar
0,2-1,5	sehr gering
1-3	gering
3-6	mittel
>6	groß

### **Messzeitraum**

Es wurden zu drei verschiedenen Zeitpunkten die Farben an den definierten Messpunkten gemessen:

1. Messung: 24.01.2011
2. Messung: 13.02.2012 (385 Tage nach der ersten Messung)
3. Messung: 09.10.2016 (2085 Tage nach der ersten Messung)

### **Auswahl der Messpunkte**

Es wurden Messungen an 18 Messpunkten durchgeführt:

- 3 Messpunkte an dunklen Ziegeln eines gedämmten Gewölbes
- 3 Messpunkte an hellen Ziegeln eines gedämmten Gewölbes
- 3 Messpunkte an Fugen eines gedämmten Gewölbes
- 3 Messpunkte an dunklen Ziegeln eines ungedämmten Gewölbes
- 3 Messpunkte an hellen Ziegeln eines ungedämmten Gewölbes
- 3 Messpunkte an Fugen eines ungedämmten Gewölbes

Mit der Auswahl/Vorsortierung in helle Bereiche, dunkle Bereiche und Fugenbereiche soll die komplette Bandbreite der Veränderungen erfasst werden. Die Auswahl der Punkte erfolgte nach den Beobachtungen vor Ort am 24.01.2011. Die Messpunkte wurden mit einer Messschablone gekennzeichnet, mit deren Hilfe eine Wiederfindung des Messpunktes sichergestellt werden konnte. (Abb. 90 und Abb. 91)

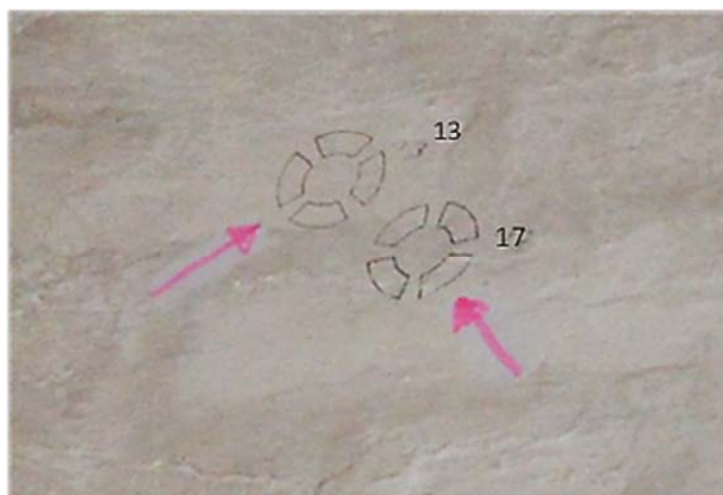


Abb. 90 Kennzeichnung der Punkte durch eine Messschablone. Gemessen wird im Zentrum der Figur; (09.10.2016)  
Quelle: Quelle: N. Lange



Abb. 91 Farbmessgerät "spectro-guide sphere gloss" (links) / Messschablone (rechts)  
Quelle: Quelle: N. Lange

### **flankierende Einflüsse**

Im Zeitraum vom September-Oktober 2011 bis Februar-März 2012 wurden umfangreiche Arbeiten am Kirchenboden mit tiefgreifenden Ausschachtungen und großflächigen Freilegungen durchgeführt. In dieser Zeit sind überdurchschnittlich hohe Luftfeuchtwerte anzutreffen, die direkt ggf. höhere Bauteilfeuchte erzeugen können und zu temporären (rückführbaren) Farbänderungen führen, aber auch zu dauerhaften (die normale Nutzung nicht repräsentierenden) Verfärbungen beitragen können.

Die ersten beiden Messtermine lagen im Frühjahr, der letzte Messtermin lag im Herbst. Jahreszeitliche Unterschiede können jedoch eine Rolle spielen, da der technische Mindestwärmeschutz zur Tauwasserfreihaltung bei den vorherrschenden Bedingungen ggf. nicht eingehalten ist.

### **11.3 Beobachtungen / Messdaten**

#### **Visuelle Beurteilung**

Bei flüchtiger Ansicht der zu vergleichenden Flächen der gedämmten und ungedämmten Gewölbe ist kein wesentlicher Unterschied auszumachen. Unterscheidungen stehen also hinter

den allgemeinen Farb- und Helligkeitsunterschieden durch Beleuchtung, Schattenwurf usw. zurück. Bei genauerer Betrachtung sind jedoch deutlich Gemeinsamkeiten und Unterschiede erkennbar. Gemeinsam ist, dass eine deutliche Strukturierung in Stein- und Fugenbereiche ersichtlich ist, wobei diese beim ungedämmten Bereich, insbesondere in der von dem gedämmten Gewölbe abgewandten Seite (links), ganz deutlich und durchgehend ist (sich also jeder einzelne Stein und das Steinformat unter den Putzfläche verorten lässt). Der gedämmte Bereich zeigt diese Strukturierung nicht mehr so deutlich. Die genauen Orte der Fugen lassen sich dort also nur noch erahnen, wobei nur einzelne Steine eine deutliche Identifizierung in Form einer Dunkelfärbung ermöglichen. Im ungedämmten Bereich grenzen sich die dunkleren Fugenbereiche von den helleren Ziegeln ab, wogegen im gedämmten Bereich die Fugen eher heller hervortreten.



Abb. 92 Sicht auf das gedämmte Gewölbe mit den gekennzeichneten Messpunkten; (09.10.2016)  
Quelle: Quelle: N. Lange

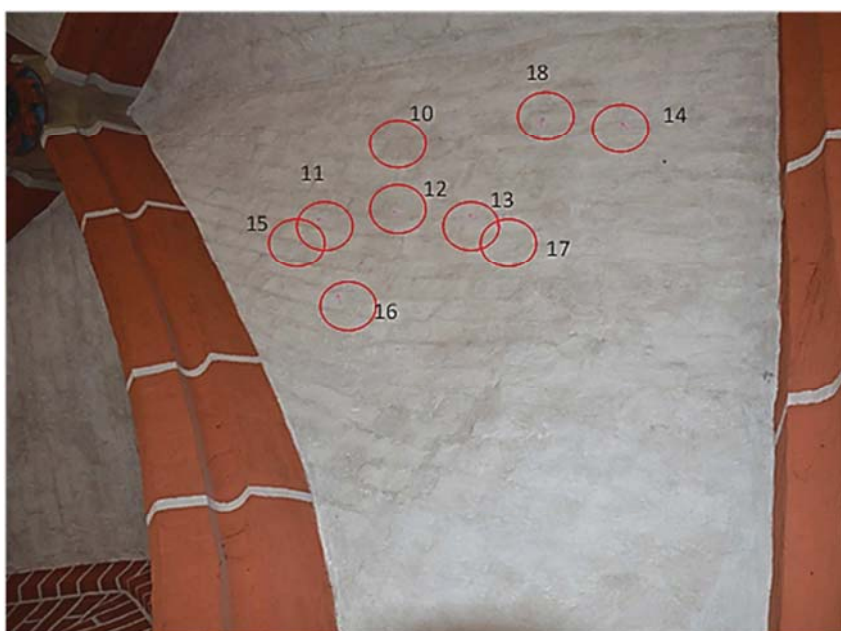


Abb. 93 Sicht auf das ungedämmte Gewölbe mit den gekennzeichneten Messpunkten; (09.10.2016)  
Quelle: Quelle: N. Lange

## Messdaten

In den Diagramm 1 bis Diagramm 12 (Abb. 94 bis Abb. 105) wurden die Messwerte nach Frequenzbereichen aufgetragen, wobei nach Messzeitpunkten und Messorten differenziert wurde. Weiterhin erfolgte eine Darstellung nach Veränderungen in verschiedenen Zeiträumen, die sich aus den Messzeitpunkten ergeben.

### dunkle Steinbereiche gedämmt: Diagramm 1 und 2

- Bei den dunklen Steinbereichen auf gedämmtem Gewölbe liegen die Linien der Messtermine dicht und fast synchron. Mit zunehmender Frequenz steigt die Reflexion an.
- Im Zeitraum von 2011 bis 2012 verbesserte sich der Reflexionswert in den tieferen Frequenzen geringfügig (bis ca. 0,3%-Punkte), wogegen sich die Reflexion bei den höheren Frequenzen verschlechtert hat (bis ca. 0,8%-Punkte). Mittelwert: ca. 0,3%-Punkte Verschlechterung.
- Im Zeitraum von 2011 bis 2016 verbesserte sich das Reflexionsvermögen der Oberfläche von den niedrigen Frequenzen beginnend mit ca. 1,6%-Punkte bis zu den hohen Frequenzen bis ca. 0,3%-Punkte deutlich. Mittelwert: ca. 0,9%-Punkte Verbesserung.
- Die sich über das sichtbare Frequenzband einstellende ungleichmäßige Veränderung deutet an dieser Stelle neben der Helligkeitsänderung ebenfalls auf eine (leichte) Farbänderung hin.

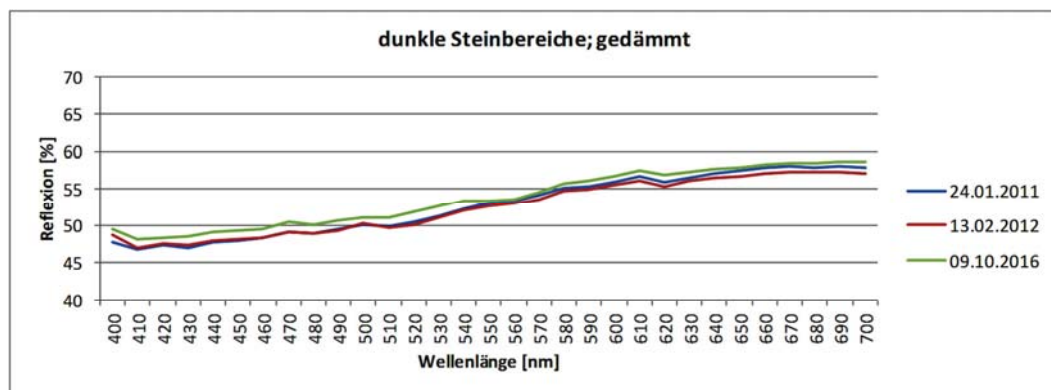


Abb. 94 Diagramm 1  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, gedämmt, für die Messtermine (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange

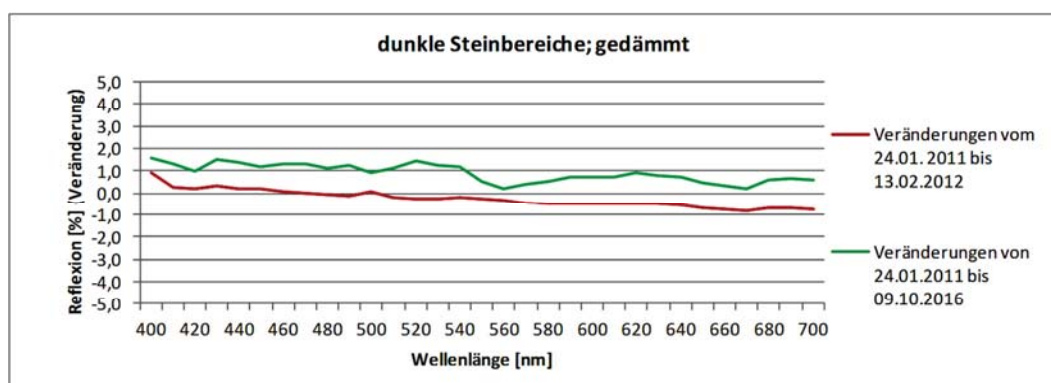


Abb. 95 Diagramm 2  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, gedämmt und ungedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

dunkle Steinbereiche ungedämmt: Diagramm 3 und 4

Bei den dunklen Steinbereichen auf ungedämmtem Gewölbe zeigt sich ein deutlich anderes Bild im Vergleich zu den vorgenannten gedämmten Bereichen. Die Ausgangswerte der gedämmten Bereiche von 2011 liegen jedoch bei den niedrigen Frequenzen ca. 1,2 %-Punkte und bei hohen Frequenzen ca. 3,3 %-Punkte unter denen der ungedämmten Bereiche. Dieser Unterschied ist ein Ergebnis der unterschiedlichen Vergrauung seit dem Farbauftrag bis zur ersten Messung unter den unterschiedlichen Bedingungen.

- Die Reflexionswerte vom zweiten Messtermin liegen im Durchschnitt ca. 0,3 %-Punkte über denen der ersten Messung, bei geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. 0,8 %-Punkten bei niedrigen Frequenzen und ca. -0,2 %-Punkten bei den höheren Frequenzen. Es ist also eine unmerklich leichte Verbesserung des Reflexionsvermögens in weiten Frequenzbereichen und im Durchschnitt festzustellen.
- Die Reflexionswerte von der dritten Messung liegen im Durchschnitt ca. 3,9 %-Punkte unter denen der ersten Messung, bei ebenfalls geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. -2,7 %-Punkten bei den niedrigen Frequenzen bis zu ca. -4,9 %-Punkten bei den höheren Frequenzen. Es ist also ein deutliches weiteres Fortschreiten der Verschlechterung des Reflexionsvermögens bei leichter Farbänderung festzustellen.
- Der Verbesserung von 0,9 %-Punkten beim dunklen gedämmten Gewölbe steht die Verschlechterung von 3,9 %-Punkten beim dunklen ungedämmten Gewölbe gegenüber und ergibt einen (positiven) Unterschied von ca. 4,8 %-Punkten über die Beobachtungszeit von 5,7 Jahren.
- Die relative Besserstellung der Entwicklung beim gedämmten Gewölbe in Bezug auf die erste Messung spiegelt sich auch in den Absolutwerten wieder. So wurden die dunklen gedämmten Gewölbe zum dritten Messtermin auch um 5,9 %-Punkte heller als die dunklen ungedämmten Gewölbeflächen gemessen.

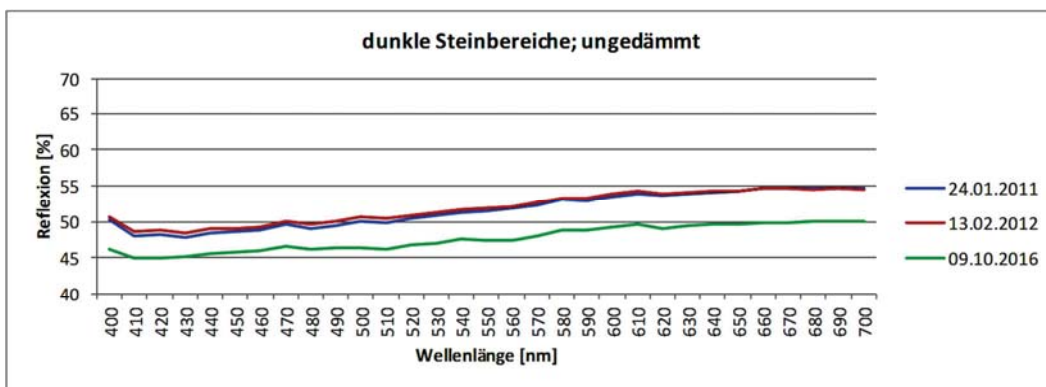


Abb. 96 Diagramm 3  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, ungedämmt für die Messtermine (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange



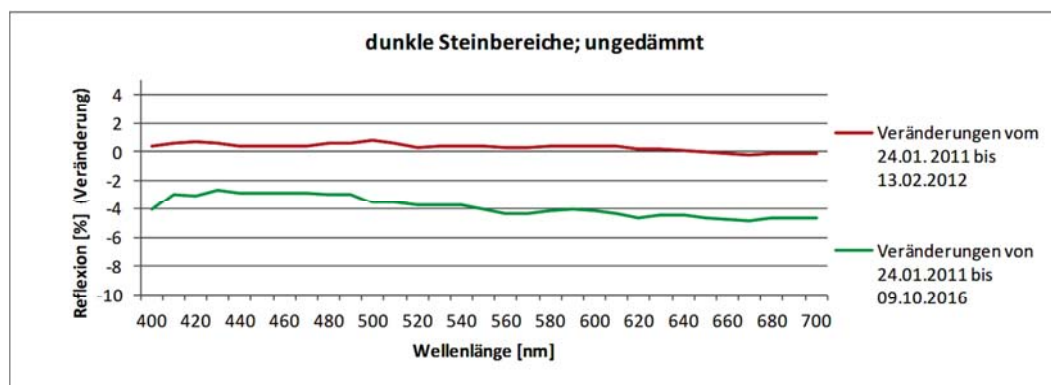


Abb. 97 Diagramm 4  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, ungedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

helle Steinbereiche gedämmt: Diagramm 5 und 6

Zwischen den Durchschnittswerten der Reflexionswerte der dunklen gedämmten Steinbereichen und der hellen gedämmten Steinbereichen liegen ca. 9,6%-Punkte Reflexionsverlust. Dies ist auch deutlich am Aussehen erkennbar. Diese Vergrauung hat sich in der Zeit nach dem Farbauftrag bis zur Realisierung der Dämmung (der mit einem Wassereintrag in das Steinmaterial verbunden war) und dem ersten Messtag eingestellt und ist summarisch mit den Änderungen nach Dämmung bis zum ersten Messtermin entstanden. (oder wurde nach der Dämmung nochmals farbbeschichtet?) Ein Ausreißerwert bei der Einstiegswellenlänge von 400 nm wird nicht berücksichtigt!

- Bei den hellen Steinbereichen auf gedämmtem Gewölbe liegen die Linien der Messtermine nicht ganz so dicht wie bei den dunklen Steinbereichen.
- Im Zeitraum von 2011 bis 2012 verbessert sich der Reflexionswert im Mittel um ca. 0,4%-Punkte. Einzelwerte von ca. 1,0%-Punkte im niedrigen Frequenzbereich bis zu 0,1%-Punkte im hohen Frequenzbereich.
- Im Gesamtzeitraum von 2011 bis 2016 findet jedoch eine Verschlechterung des Reflexionsvermögens um durchschnittlich 1,3%-Punkte statt. Einzelwerte von ca. -0,3%-Punkte im niedrigen Frequenzbereich bis ca. -2,1%-Punkte im hohen Frequenzbereich.

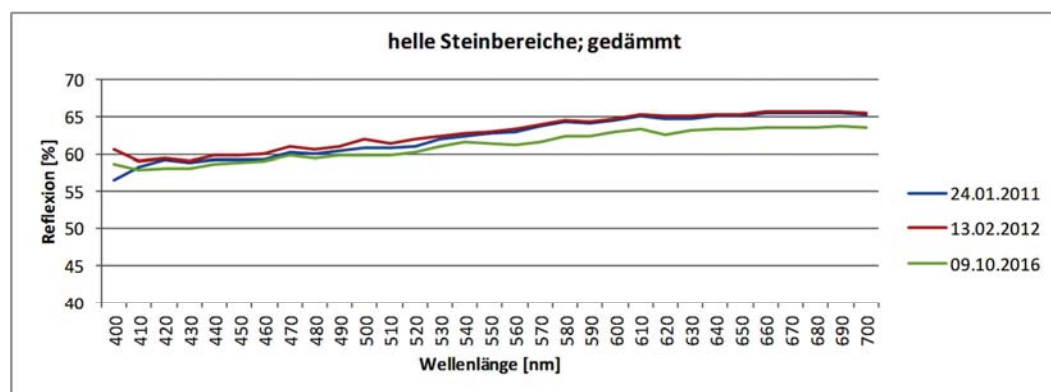


Abb. 98 Diagramm 5  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, gedämmt für die Messtermine (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange

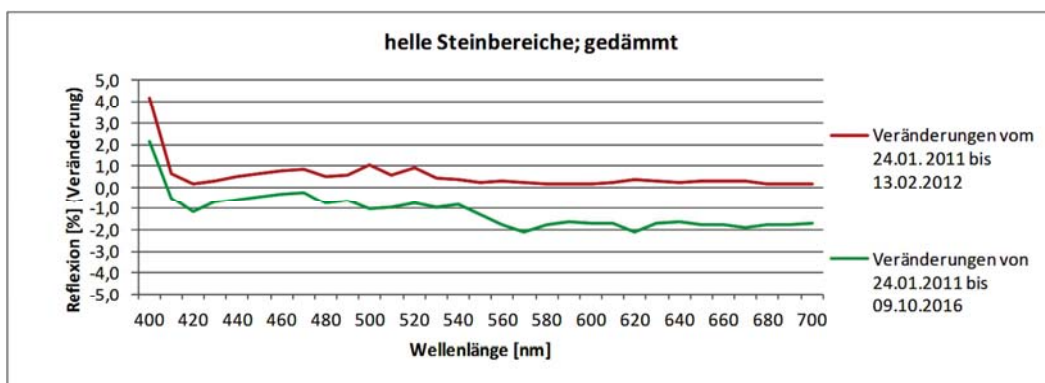


Abb. 99 Diagramm 6  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, gedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

### helle Steinbereiche ungedämmt: Diagramm 7 und 8

Bei den hellen Steinbereichen auf ungedämmtem Gewölbe zeigt sich ein deutlich anderes Bild im Vergleich zu den vorgenannten gedämmten Bereichen. Die Ausgangswerte der gedämmten Bereiche von 2011 liegen jedoch bei den niedrigen Frequenzen ca. 1,0%-Punkte und bei hohen Frequenzen ca. 1,1%-Punkte unter der ungedämmten Bereiche. Dieser Unterschied ist ein Ergebnis der unterschiedlichen Vergrauung seit dem Farbauftrag bis zur ersten Messung unter den unterschiedlichen Bedingungen.

- Die Reflexionswerte vom zweiten Messtermin liegen im Durchschnitt ca. 1,4%-Punkte unter denen der ersten Messung, bei geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. 1,0%-Punkten bei niedrigen Frequenzen und ca. 1,8%-Punkten bei den höheren Frequenzen. Es war also eine deutliche Verschlechterung des Reflexionsvermögens im kompletten Frequenzspektrum bereits nach der zweiten Messung festzustellen.
- Die Reflexionswerte von der dritten Messung liegen im Durchschnitt ca. 8,3%-Punkte unter denen der ersten Messung, bei ebenfalls geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. -10,1%-Punkten bei den niedrigen Frequenzen bis zu ca. -7,3%-Punkten bei den höheren Frequenzen. Es ist also ein deutliches weiteres Fortschreiten der Verschlechterung des Reflexionsvermögens bei nur geringer Farbänderung festzustellen.
- Der Verschlechterung von 1,3%-Punkten beim hellen gedämmten Gewölbe steht eine Verschlechterung von 8,3%-Punkten beim hellen ungedämmten Gewölbe gegenüber und ergibt einen (positiven) Unterschied von 7,0%-Punkten im Beobachtungszeitraum von 5,7 Jahren.
- Die relative Besserstellung der Entwicklung beim gedämmten Gewölbe in Bezug auf die erste Messung spiegelt sich auch in den Absolutwerten wieder. So wurden die hellen gedämmten Gewölbeflächen zum dritten Messtermin auch um 7,3%-Punkt heller als die hellen ungedämmten Gewölbeflächen gemessen.

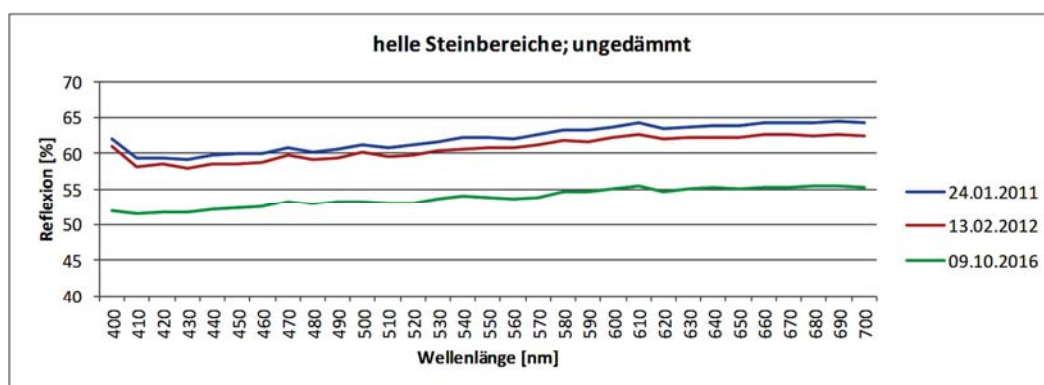


Abb. 100 Diagramm 7  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, ungedämmt für die Messtermine (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange

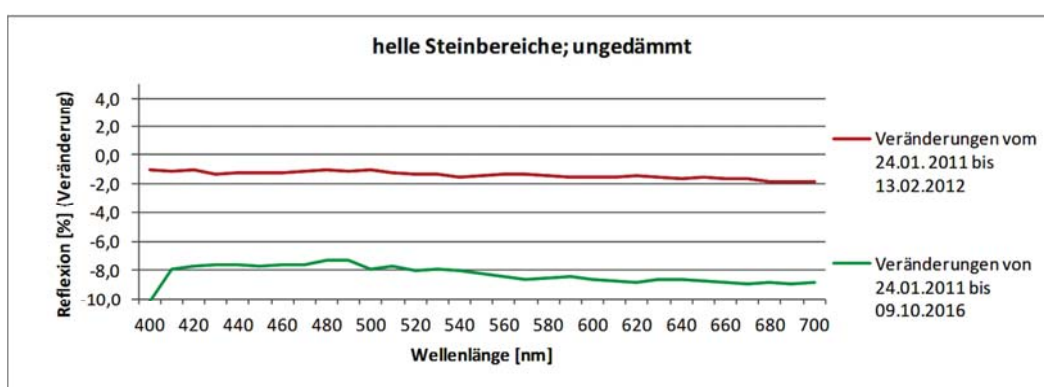


Abb. 101 Diagramm 8  
Messwerte der Frequenzbereiche heller Steine, ungedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

### Fugenbereiche gedämmt: Diagramm 9 und 10

Das Diagramm 9 zeigt einen fast deckungsgleichen Verlauf der Linien der Messungen von 2012 und 2016 (mittlerer Abstand ca. 0,3%-Punkte), d.h. dass zwischen der 2. und 3. Messung kaum noch Farbveränderungen stattgefunden haben. Allerdings sind Reflexionswerte um ca. 3,0%-Punkte bei der zweiten Messung und 3,3%-Punkte bei der dritten Messung geringer als die der ersten Messung. Die weitere Vergrauung der Fugen ist also nach der zweiten Messung fast vollständig zum Erliegen gekommen.

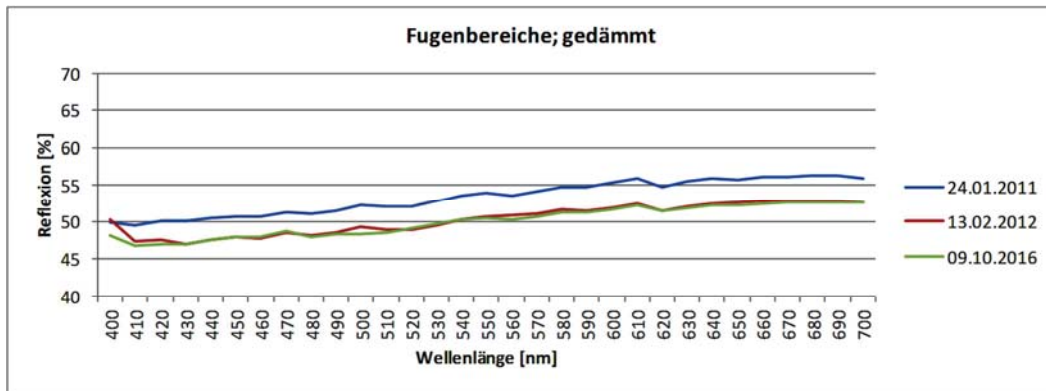


Abb. 102 Diagramm 9  
Messwerte der Frequenzbereiche der Fugengebiete, gedämmt für Messtermine (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange

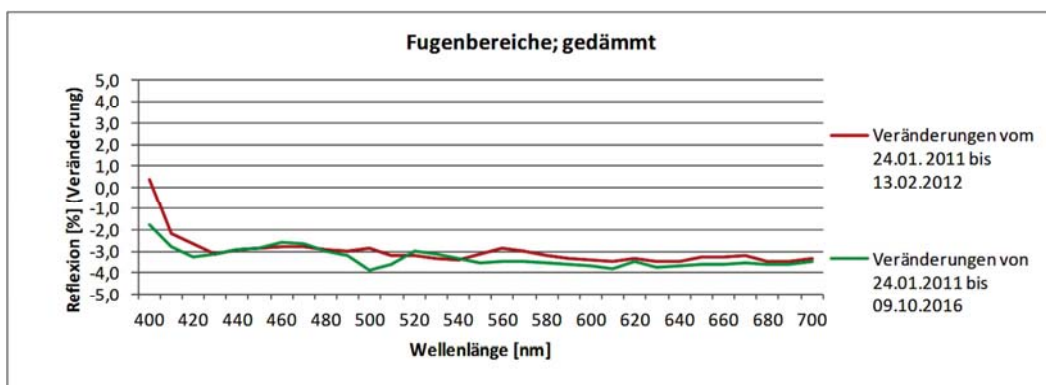


Abb. 103 Diagramm 10  
Messwerte der Frequenzbereiche der Fugengebiete, gedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

### Fugengebiete ungedämmt: Diagramm 11 und 12

Bei den Fugengebieten im ungedämmten Gewölbebereich zeigt sich ein anderes Bild.

- Die Reflexionswerte vom zweiten Messtermin liegen im Durchschnitt ca. 3,0%-Punkte unter denen der ersten Messung, bei nur geringfügig geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. 2,6%-Punkten bis ca. 3,2%-Punkten. Es ist also eine deutliche Verschlechterung des Reflexionsvermögens im kompletten Frequenzspektrum im Zeitraum zwischen der ersten und zweiten Messung festzustellen.
- Die Reflexionswerte von der dritten Messung liegen im Durchschnitt ca. 0,7%-Punkte über denen der ersten Messung, bei ebenfalls geringerer Steigung der Linie. Einzelwerte von ca. -0,3%-Punkten bis ca. 1,2%-Punkten. Es ist also eine deutliche Verbesserung der Reflexion der Fugengebiete gegenüber der zweiten Messung eingetreten. Die Verbesserung führte zur vollständigen Rückführung der Vergrauungen und ergeben Reflexionswerte noch über den Stand der ersten Messung.
- Die Verschlechterung von 3,3%-Punkten bei den Fugen der gedämmten Gewölbe steht eine Verbesserung von 0,7%-Punkten bei den Fugen der ungedämmten Gewölbe gegenüber und ergibt einen (negativen) Unterschied von 4,0%-Punkten im Beobachtungszeitraum von 5,7 Jahren.

- Die relative Besserstellung der Entwicklung beim ungedämmten Gewölbe in Bezug auf die erste Messung spiegelt sich auch in den Absolutwerten wieder. So wurden die Fugenflächen der ungedämmten Gewölbe zum dritten Messtermin auch um 5,5 %-Punkt heller als die Fugenflächen der gedämmten Fugenflächen gemessen. (Dies wieder spricht der subjektiven optischen Wahrnehmung!)

Die dargestellten Werte repräsentieren Reflexionswerte, welche bezüglich der Wahrnehmbarkeitsunterschiede nicht bewertet sind. Sie stellen also rein physikalische Werte dar. In den Diagrammen 13 bis 15 (Abb. 104 bis Abb. 108), mit den dazugehörigen Grunddaten in den Tabellen 1-3, sind die zu den in den vorgenannten Diagrammen dargestellten frequenzspezifischen Werte gehörenden wahrnehmungsbezogenen Werte im CIE L\*a\*b\*- Farbraum aufgezeichnet und verglichen. Die Werte werden durch das Messgerät berechnet und direkt in einer Ergebnismatrix ausgegeben. Zum Vergleich der Messungen wurden die  $\Delta L$ ,  $\Delta a$  und  $\Delta b$  –Werte, sowie die resultierenden  $\Delta E$  – Werte errechnet, welche gemäß der Kriterien nach dem Abschnitt „Der L\*a\*b\* - Farbraum“ eine Beurteilung der visuellen Erkennbarkeit der Farb-/Helligkeitsänderung ermöglichen (also die unterschiedliche Wahrnehmbarkeit der einzelnen Frequenzbereiche berücksichtigen). Folgende Ergebnisse zeigen sich:

- Die Veränderungen bei den CIE L\*a\*b\* - Werten zeigen fast durchweg Verschiebungen der Farbe in den blau-grünen Bereich (fast alles negative  $\Delta a$ - und  $\Delta b$ -Werte), aber alles in sehr geringen Absolutwerten, die sich allein der direkten Wahrnehmung entziehen.
- Die Hauptänderungen geschehen in den  $\Delta L$ -Werten. Die bereits dunklen Bereiche dunkeln über den Zeitraum nur noch wenig nach, wogegen die hellen Bereiche i.A. stärker nachdunkeln.
- Die Änderungen vom ersten Messtermin zum dritten Messtermin bei den gedämmten Bereichen ist mit  $\Delta E$  von 0,71 bis 2,03 (Mittelwert: 0,96) in einem sehr gering wahrnehmbaren Bereich verblieben.
- Die Änderungen vom ersten Messtermin zum dritten Messtermin bei ungedämmten Bereichen sind mit  $\Delta E$  von 0,49 bis 4,65 (Mittelwert: 2,29) deutlich größer aber noch in einem gering wahrnehmbaren Bereich verblieben.
- Störend können vor allem die Strukturen bildenden Helligkeitswechsel (Ziegelraster) sein, die durch große Helligkeitsunterschiede auf kurzen Distanzen gekennzeichnet sind.

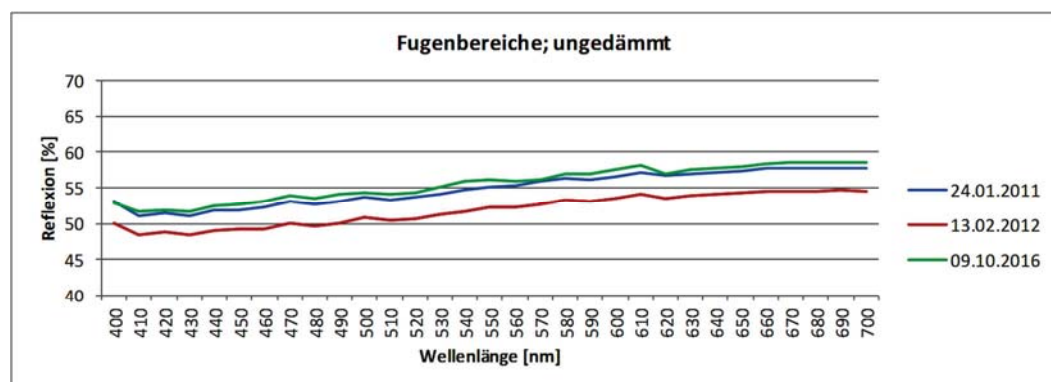


Abb. 104 Diagramm 11  
Messwerte der Frequenzbereiche der Fugenbereiche, ungedämmt für Mess-terminen (Absolutwerte)  
Quelle: Quelle: N. Lange

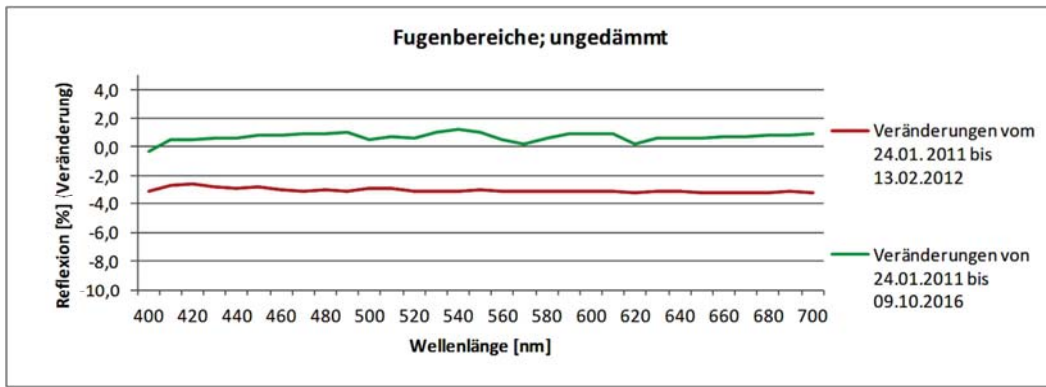


Abb. 105 Diagramm 12  
Messwerte der Frequenzbereiche der Fugenbereiche, ungedämmt für die Messtermine (Änderungen zum ersten Messtermin)  
Quelle: Quelle: N. Lange

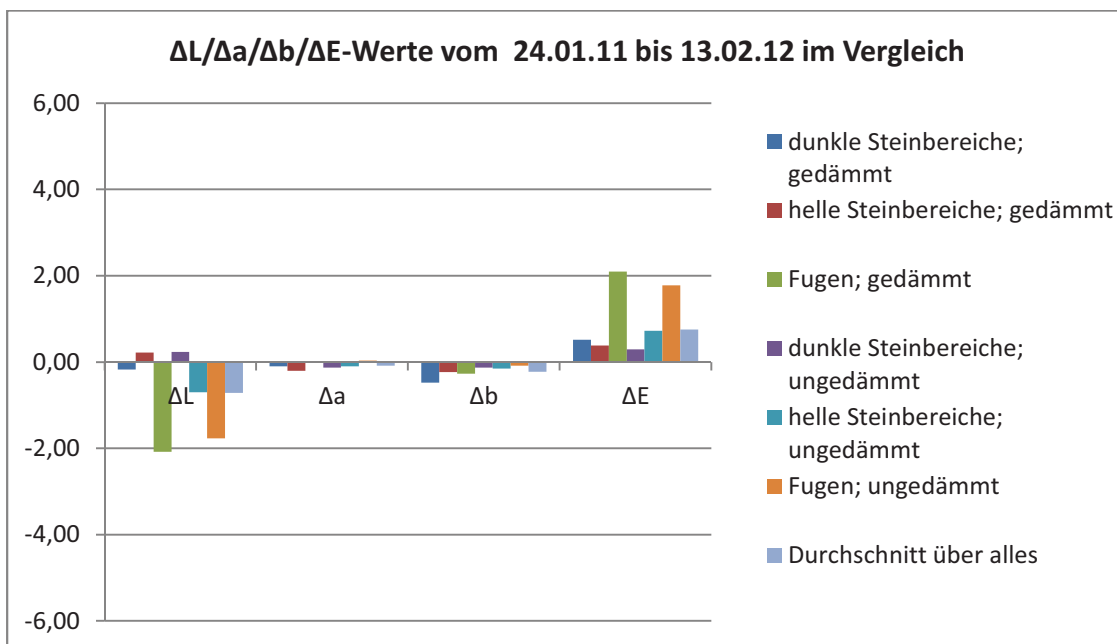


Abb. 106 Diagramm 13  
Vergleich der Änderungen der  $L^*/a^*/b^*$  - Werte für die verschiedenen Messstellen  
Quelle: Quelle: N. Lange

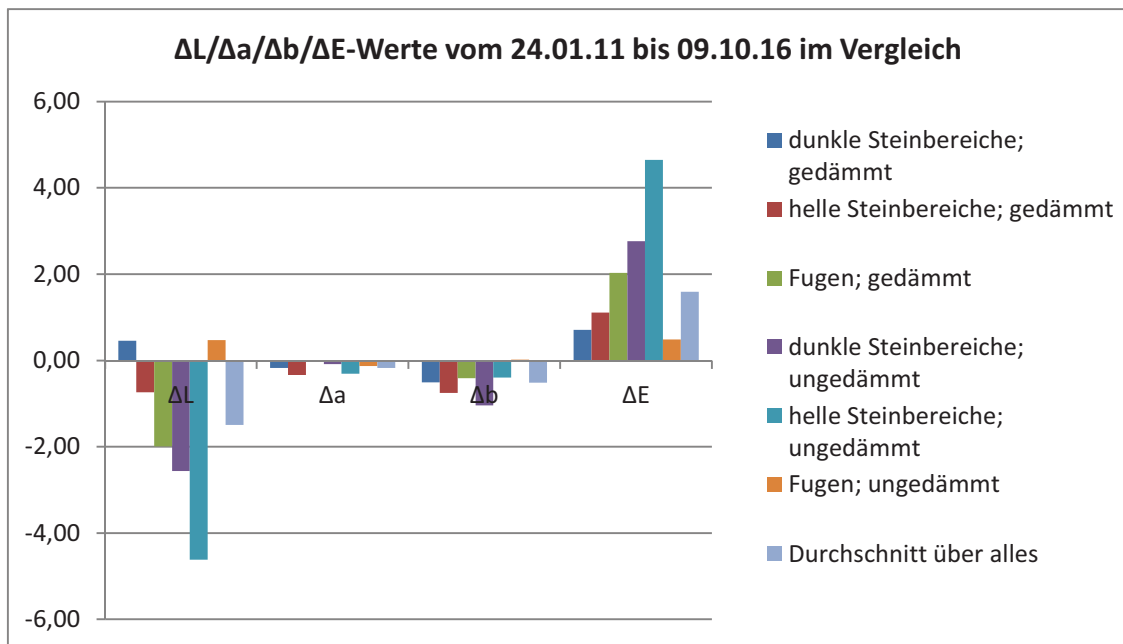


Abb. 107 Diagramm 14  
Vergleich der Änderungen der L\*/a\*/b\* - Werte für die verschiedenen Messstellen  
Quelle: Quelle: N. Lange

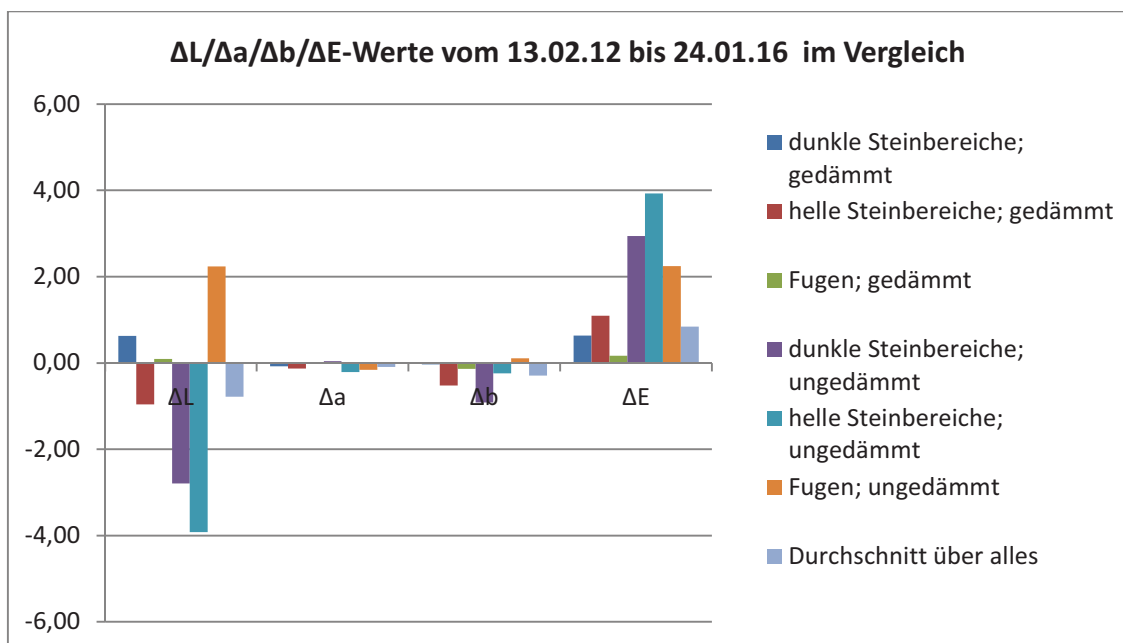


Abb. 108 Diagramm 15  
Vergleich der Änderungen der L\*/a\*/b\* - Werte für die verschiedenen Messstellen  
Quelle: Quelle: N. Lange

#### 11.4 Interpretation der Messdaten

Die Messwerte der hellen und dunklen Ziegelflächen zeigen deutliche Unterschiede bei der zeitlichen Entwicklung der Vergrauungen bei Gewölbeabschnitten mit und ohne außenseitige Gewölbedämmung. Bei den zur ersten Messung als dunkel klassifizierten Gewölbeteilen konnte eine Aufhellung bei den gedämmten Gewölbeabschnitten festgestellt werden - bei den hell klassifizierten Gewölbeteilen eine Verringerung des Fortschrittes der Vergrauung. Jahreszeitliche Einflüsse können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Die Änderungen betreffen in weit

überwiegendem Maße die Helligkeit und nur im nicht wahrnehmbaren Bereich die Farbtönung, die sich jedoch in gemessenen Werten in den blau-grünen Bereich verschiebt. Die Messergebnisse bei den Fugenbereichen stehen im Gegensatz zu den subjektiven Beobachtungen (siehe "visuelle Beurteilung"). Inwieweit dies auf eine "unglückliche Auswahl" der Messpunkte zurückzuführen ist, bleibt offen. Die visuell wahrnehmbaren Änderungen sind gekennzeichnet durch ein beginnendes Verschwimmen der Konturen der Flächen unterschiedlicher Helligkeiten.

### **11.5 Schlussfolgerungen, Aussichten**

Die Messungen konnten eine (eingeschränkte) Wirksamkeit der Gewölbedämmung nachweisen ohne, dass jedoch der fortschreitende Vergrauungsprozess durchgängig gestoppt werden konnte. Eine moderate Dämmung allein kann also die Problematik der fortschreitenden Vergrauung nicht lösen, allerdings die Renovierungszyklen verlängern und wohl auch den Wärmebedarf der Kirche verringern. Die Art der Vergrauungen und die Wirkmechanismen, die zur Entstehung führen, bleiben jedoch ungeklärt. Dazu bieten sich mikroskopische und chemische Analysen der Vergrauungen (im Vergleich zu den nicht vergrauten Wand- und Deckenflächen) an, die dann als Grundlage für andere Lösungsansätze präziser Ursachen aufdecken können. Ebenfalls kann eine Überprüfung der Feuchtebilanz der Gewölbekonstruktion für den Jahreslauf unter den möglichen realen Klimabedingungen angeregt werden.



## 12 Fazit und Projekterkenntnisse

Der vorliegende Abschlussbericht zum DBU – Projekt „Untersuchung modellhafter Maßnahmen zur gleichzeitigen Reduzierung des Energieverbrauchs, Verbesserung des Nutzerkomforts und Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes temporär genutzter Sakralbauten“ (AZ 28066) zeigt Optimierungsmaßnahmen für die lokale thermische Behaglichkeit im Bereich des Chorgestühls und zu den Windschottsystemen an Kirchenfenstern der Klosterkirche St. Marienstern auf. Die Raumtemperatur der Klosterkirche musste aufgrund der Folgen der bisherigen Beheizung u.a. Schäden an der Inneneinrichtung, der Orgel und Verschmutzungen an den Wänden, abgesenkt werden. Siehe hierzu auch die Ergebnisse aus dem Projekt „Nutzungsorientierte optimierte Lokaltermierung in Kirchen – modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung“ (AZ 24824). In diesem Zusammenhang war es dringend geboten, Abhilfemaßnahmen zu schaffen, um den Schwestern einen behaglichen Aufenthalt in der Klosterkirche, insbesondere im Chorgestühl, zu ermöglichen.

Auf Grundlage der bekannten Zusammenhänge zur thermischen Behaglichkeit wurde festgestellt, dass durch die geringen Temperaturen in der Klosterkirche, den Aktivitätsgrad der Nonnen und die vorhandene Luftgeschwindigkeit (Zugluft) keine thermische Behaglichkeit ohne eine zusätzliche Heizung bzw. einer Reduzierung der Zuglufterscheinungen erreicht werden kann. Nach Untersuchungen des ehemals benutzten Chorgestühls wurde dem Orden ein Neubau empfohlen. Das vorhandene (alte) Chorgestühl wies einen erheblichen „Öffnungsgrad“ sowohl mit Blickrichtung Altar als auch zur Gemeinde auf. In diese Betrachtungen wurden die vorhandenen Raumluftrömungen in der Klosterkirche einbezogen. Die spezielle Untersuchung der Strömungen erfolgte mit einer Nebelmaschine. Die geringen inneren Oberflächentemperaturen der Kirchenfenster führen zu einer starken Abkühlung der Raumluf in diesem Bereich. Aufgrund des Dichteunterschieds fällt diese kalte Raumluf mit großer Geschwindigkeit nach unten und dringt nach Umlenkung im Fußbodenbereich in das Kircheninnere ein (Strömungsrichtung primär von Nord nach Süd mit Überlagerung durch die am Hussitenfenster ausgelöste Strömung). Die Bleiglasfenster weisen einige Besonderheiten auf. Speziell am Hussitenfenster baut sich die größte Strömungsgeschwindigkeit durch eine spezielle Halte- und Hinterlüftungskonstruktion auf. Das daraus erstellte „Strömungsmodell“ hat bei allen an den Untersuchungen Beteiligten wesentlich zum Verständnis der Zuglufterscheinungen beigetragen. Auf Grundlage einer Literaturrecherche über Entstehung und Berechnung von Fallluftströmungen wurden zumindest theoretische Grundlagen für Abhilfemaßnahmen geschaffen. Im Rahmen dieser Arbeit mussten begründete Annahmen getroffen werden, auf deren Grundlage Größen wie z.B. Massenstrom der Luft abgeschätzt werden konnten. Aktive und passive Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit wurden aufgezeigt und bewertet. Dabei stellte sich ein Windschott an den Maßwerkfenstern der Nordseite als beste Maßnahme für die Reduzierung der Fallluftströmung in der Klosterkirche heraus. Diese Windschotte wurden mit unterschiedlichen Materialien bemustert (Textil und Plexiglas), bemessen und für die Fenster der Nordseite im Jahr 2012 installiert. Bisher erfüllen diese textilen Windschottsysteme ihre Aufgaben zur vollsten Zufriedenheit. Dennoch werden nicht alle Zuglufterscheinungen im Kirchenschiff unterbunden. So sind die beiden Kirchenbereiche der Nord-West-Ecke und der Nord-Ost-Ecke immer noch als ein „Motor“ für starke Kaltluftabfälle anzusehen. Hier sollten weitere Überlegungen zur Reduzierung dieser Kaltluftabfälle erfolgen. Ungeachtet dessen müssten zur Minimierung des Einflusses des „baukonstruktiv komplizierten“ Hussitenfensters weitere Untersuchungen erfolgen. Auch für das ehemals vorhandene Fenster über der Orgel sind Untersuchungen ange raten. Die Wand ist in diesem Bereich scheinbar nur sehr dünn und stellt eine Kältebrücke dar.

Durch die ebenfalls geringen Oberflächentemperaturen und die beschriebenen Folgen übt dieser Wandbereich ebenfalls Einfluss auf die Raumluftrichtung aus.

Weiterhin hat sich dieses Projekt mit einer Konzeptbetrachtung für den Neubau eines Chorgestühls befasst. Nach einer Analyse der Randbedingungen und dem Erarbeiten einer Anforderungsliste wurde die Ausgangssituation übersichtlich dargestellt. Bei dem Aufstellen und Zusammenstellen der Konzepte waren die Beteiligten bemüht, alle aktiven und passiven Maßnahmen getrennt voneinander darzustellen und zu bewerten. Durch das Erstellen eines 3-Zonen-Modells und das Bewerten der Heizsysteme, abgestimmt auf das Kloster und die Anforderungen der Nonnen, konnte eine „bisher in der Literatur nicht nachgewiesene Herangehensweise“ bei der Auswahl der richtigen Systeme herausgearbeitet werden. Der empfohlene Aufbau ist in einer Matrix sowie in einem Flächenmodell dargestellt. Bei allen Untersuchungen und Aussagen war es wichtig, dass sowohl ein Statiker (Tischler) als auch ein Gestalter (Innenarchitekt oder Holzkünstler) auf dem theoretischen Modell zur Herstellung der thermischen Behaglichkeit praktisch aufbauen kann. Es wurde versucht, an die Fertigung zu denken und das Gestühl für eine Modulbauweise auszulegen. Jedes Bauteil wurde einzeln auch unter dem Aspekt der Zweckmäßigkeit betrachtet. Theoretische Untersuchungen der Strömungsverläufe am Chorgestühl sowie Berechnungen einzelner Bauteile bilden die Grundlage für Empfehlungen an den Orden im Hinblick auf die Gestaltung des Chorgestühls. Schwachstellen in der derzeitigen Heizungstechnik wurden aufgezeigt und Änderungshinweise gegeben. Durch die Berechnung der thermischen Behaglichkeit anhand eines wärmephysiologischen Prüfmodells konnte ein sehr guter Bezug für das abschließende Modell gefunden werden. Kritisch wird eingeschätzt, dass aufgrund der Stärke der umgebenden Einflüsse eine thermische Behaglichkeit nicht in jedem Bereich des Chorgestühls zu erwarten ist. Dessen ungeachtet wird eine Steigerung der Behaglichkeit/Erträglichkeit im Aufenthaltsbereich erwartet. Abschließend wurde dem Kloster zum Aufbau eines Prototyps geraten. Damit konnten wichtige Erfahrungen gesammelt und Fehlinvestitionen ausgeschlossen werden. Mit den erbrachten Messungen, geleisteten Untersuchungen und getätigten Berechnungen wurde ein fundierter Lösungsvorschlag erarbeitet und eine begründete sowie weitgehend abgestimmte Grundlage für den Neubau eines Chorgestühls geschaffen.

Die Untersuchungen am Kirchengewölbe zur Farbveränderung haben aufgezeigt, dass eine Gewölbedämmung zur Reduzierung einer erneuten Verschmutzung beitragen kann. Jedoch sind die zeitlichen Abfolgen nicht eindeutig abschätzbar. So kann der Kosten – Nutzen – Aspekt nicht eindeutig geklärt werden. Hier gibt es weiteren Untersuchungsbedarf, da der erbrachte Forschungsansatz vielversprechend scheint.

Die allgemeinen raumklimatischen Untersuchungen des Kirchenschiffes zeigen keine Verschlechterung des raumklimatischen Zustandes auf. Die Absenkung der Raumlufthtemperatur in der Heizperiode hatte keine Erhöhung der relativen Luftfeuchte in der Raumlufthtemperatur zur Folge. Auch konnten bisher keine Schäden durch Feuchtigkeit am Mauerwerk festgestellt werden. Trotzdem besteht ein Bedarf an einer kontrollierten Raumlüftung des Kirchenraumes. Dies wurde bereits im Vorprojekt 2007 – 2008 angesprochen und sollte für eine nachhaltige Verbesserung des allgemeinen raumklimatischen Zustandes zeitnah baulich umgesetzt werden. Hier sind natürlich denkmalpflegerische Belange von größter Wichtigkeit und die Ziele einer solchen kontrollierten Raumlüftung müssen noch genauer definiert werden.

## 13 Quellenverzeichnis

Raiß, Wilhelm (1960) Lehrbuch der Heizung und Lüftungstechnik, 14. Auflage, Berlin, Springer Verlag

Kriegel, Bernd (1973) Fallströmungen vor Abkühlungsflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen. Dissertation. Erscheinungsort: Berlin

Hanel, Bernd (1990): Einführung in die konvektive Wärme- und Stoffübertragung. 1. Auflage. Erscheinungsort: Berlin. Verlag Technik

ARENDE, K. (1993) Raumklima in großen historischen Räumen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln

Glück, Bernd (05/2001), Wärmeübertragung. Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren; [www.berndglueck.de/waermeuebertragung.php](http://www.berndglueck.de/waermeuebertragung.php)

Olesen, B., (2002) W: Sind „kalte“ Fensterflächen heute überhaupt ein Problem für die Behaglichkeit? 24. Internationaler Velta-Kongress 2002, Tagungsband S. 81-96; Stadler Verlagsgesellschaft, Konstanz 2002

KALISCH, U. (2006) Bau und Kunstdenkmale unter dem Einfluss wechselnder Klimafaktoren, in: Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege – 10 Jahre IDK, Hrsg.: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. 2006, S. 7-22.

Heimsch, R. u. a (2006): Ermittlung und Validierung von Planungsparametern zur Optimierung des Wärmebedarfs, der thermischer Behaglichkeit und Regelung für einen energiesparenden und bausubstanzerhaltenden Betrieb temporär genutzter Gebäude mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation und vergleichenden Feldmessungen am Beispiel von St. Marien und St. Georgen in Wismar, Forschungsprojekt, DBU AZ.20841, Ingenieurbüro Rainer Heimsch, Rastede, 2006

Willems, Wolfgang M. (2006) Handbuch Bauphysik Teil 1; Wärme und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung; 1. Auflage, Wiesbaden, Vieweg-Verlag

LÖTHER, Th. (2008) Ziele und Grenzen der Beheizung sakraler Gebäude, Denkmalpflege in Sachsen, Jahrbuch 2008, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Sax-Verlag Beucha, S. 95 -96.

Köhler, D (2008) Energieversorgungskonzept für eine denkmalgeschützte Klosteranlage, HTWK Leipzig, Fachbereich Maschinen- und Energietechnik, Masterarbeit, 2008

Winzler, M. (2008) St. Marienstern, der Stifter, das Kloster, sein Heiltum und die Kunst Mitteleuropas im 13. Jahrhundert, Dissertation TU-Berlin.

IDK e.V. (2009) FRANZEN, C., LÖTHER, T., KELM, C., MEINHOLD, U. Nutzungsorientierte, optimierte Lokalterperierung von Kirchen - modellhafte Voruntersuchungen und Konzeptentwicklung, Abschlussbericht zum DBU-Projekt AZ: 24824, DD 60/2008, 129 S., DOI: 10.5165/hawk-hhg/63

Krull, Diethelm (2009); Praxishandbuch der technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Installationssysteme, Flächenheiz- und -kühlsysteme. 1. Auflage. Erscheinungsort: Haßfurt. Beuth-Verlag

WTA-Merkblatt "Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken" (2009): WTA-Merkblatt E 6-12: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

Großmann, Holger (2010) Pkw-Klimatisierung . Physikalische Grundlagen und Technische Umsetzung. 1. Auflage. Erscheinungsort: Heidelberg. Springer-Verlag

Schmidt, Gerd-Dietrich (1996) Formeln und Tabellen. Für die Sekundarstufe I und II. 9. Auflage. Erscheinungsort: Berlin. Verlag Paetec

Frei, Stefan (2011); Masterarbeit zum Thema „Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Verbesserung der lokalen Behaglichkeit im Bereich des Chorgestühls in der Kirche des Klosters St. Marienstern in Panschwitz-Kuckau“; HTWK Leipzig, Fakultät Maschinenbau und Energietechnik)

LÖTHER, T. (2011) Einfache Messung - anspruchsvolle Auswertung - Vom Umgang mit Thermohygrographen, Datenloggern und Rissmesssystemen, Grenzen und Ausblicke, Arbeitsheft des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums, Nr. 26

Ehrhardt, Bernd (03/2011): Beheizung von Kirchen. [www.frieden-umwelt-pfalz.de](http://www.frieden-umwelt-pfalz.de)

Birgid Frei in Anlehnung an o.V. (02/2011): Kloster Arenberg. <http://www.kloster-arenberg.de>

Schotes, Paul (2011) Richtlinien für die Beheizung von Kirchen; 04/2011; [www.ekhn.de/recht/bd1/821.pdf](http://www.ekhn.de/recht/bd1/821.pdf)

DIN EN 1246/1-5; 2009; Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlflächensysteme mit Wasserdurchströmung; Beuth Verlag