

Kirchenheizung

Eine Gratwanderung zwischen
Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege

Dissertation

Alexandra Troi



Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik

Kirchenheizung

Eine Gratwanderung zwischen
Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege

Dipl.-Ing. Univ. Alexandra Troi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Florian Musso

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Schuller

Die Dissertation wurde am 05.06.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 10.2.2010 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	1
1 Einleitung	3
1.1 Literatur zu Kirchenheizung	4
1.2 Aufbau und Methodik dieser Arbeit	6
2 Gratwanderung	9
2.1 Behaglichkeit	9
2.1.1 Beurteilungskriterien	11
2.1.2 ISO 7730: the Predicted Mean Vote PMV	11
2.1.3 Zwei-Knoten-Modell für transiente Energiebilanz	12
2.2 Kosten	13
2.2.1 Anschaffungskosten	14
2.2.2 Betriebskosten	14
2.2.3 „Folgekosten“	16
2.3 Denkmalpflege	16
2.3.1 Holz und Fassung	17
2.3.2 Glas und Metall	23
2.3.3 Schwärzen von Oberflächen	27
2.3.4 Biogener Befall	31
2.3.5 Schäden durch Salze	35
2.3.6 Normen und Empfehlungen	40
3 Kirchenheizung in einer Bergregion	47
3.1 Methode	47
3.1.1 Lage und Außenklima	47
3.1.2 Raumklima	48
3.1.3 Architektur, Ausstattung und Nutzung	48
3.1.4 Heizungssystem	49
3.2 Heizungssysteme und Betriebsweise	51
3.2.1 Bankheizung	53
3.2.2 Fußbodenheizung	53
3.2.3 Luftheizung	53
3.3 Temperaturniveau	54
3.3.1 Einfluss der Lage	54
3.3.2 Einfluss der Größe	55
3.3.3 Einfluss der Nutzung	55
3.3.4 Einfluss des Heizungstyps	55
3.3.5 Einfluss der Betriebsweise	55
3.4 Kosten	56
3.4.1 Betriebskosten	56
3.4.2 Anschaffungskosten	57
4 Experimentelle Raumklimauntersuchung	59
4.1 Methode	59

4.1.1	Datenerhebung	59
4.1.2	Heizungskategorien	61
4.1.3	Qualitative Untersuchung	61
4.1.4	Quantitative Untersuchung	61
4.2	Beschreibung typischer Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe	63
4.2.1	Luftheizung instationär	63
4.2.2	Luftheizung mit Grundtemperierung	63
4.2.3	Bankheizung	63
4.2.4	Fußbodenheizung	63
4.3	Vergleichende Auswertung	64
4.4	Luftheizung ist nicht gleich Luftheizung	67
4.5	Spezielle Überlegungen anhand von Beispielen	70
4.5.1	Aufheizrampe mit „Sägezahn“-Muster	70
4.5.2	Große Leistung und instationärer Betrieb	71
4.5.3	Beschränkte Heizleistung bei Bankheizung	72
4.5.4	Bankspiegel als Feuchtigkeitsquelle bei Bankheizung	73
4.5.5	Oberflächen: Material und Kontakttemperatur	74
4.5.6	Raumklima und Salzausblühungen	75
5	Numerische Simulation	77
5.1	Methode	78
5.1.1	Gebäude und Gitternetz	78
5.1.2	Heizung	80
5.1.3	Physikalische Modelle	80
5.1.4	Materialien	82
5.1.5	Randbedingungen	82
5.1.6	Numerische Lösung	83
5.1.7	Auswertung der Simulationsergebnisse	83
5.1.8	Berücksichtigung der Feuchtigkeit	84
5.1.9	Randbedingungen und verwendete Modelle für das Fallbeispiel (Pfarrkirche von Branzoll)	85
5.2	Ergebnisse	87
5.2.1	Übersicht: Temperaturen und Geschwindigkeiten	87
5.2.2	Geschwindigkeit und Temperatur im Längsschnitt (KH)	88
5.2.3	Geschwindigkeit und Temperatur an Oberflächen (KH)	90
5.2.4	Geschwindigkeit und Temperatur für Kirchenscheiben	92
5.2.5	Geschwindigkeit und Temperatur - Histogramme	94
5.3	Vergleich von unterschiedlichen Heizungssystemen	97
5.3.1	Heizungssysteme	97
5.3.2	Einfluss von Temperatur, Geschwindigkeit und Auslass der Zuluft	101
5.3.3	Einfluss der Gebäudehülle	103
5.3.4	Luftheizung, Fußbodenheizung und Bankheizung : Vergleich des Raumklimas im Aufenthaltsbereich anhand der Kirchenscheibe	104
5.4	Fallbeispiel: Pfarrkirche von Branzoll	105
5.4.1	Ausgangssituation in der Pfarrkirche von Branzoll	106
5.4.2	CFD-Simulation mehrerer Heizungsvarianten für die Pfarrkirche von Branzoll	108
5.4.3	Raumklima nach Einbau der neuen Heizung in der Pfarrkirche von Branzoll	112

5.5	Bewertung der CFD-Simulation als Werkzeug in der Denkmalpflege	113
6	Diskussion und Schlussfolgerung	115
6.1	Vergleich der Ergebnisse mit in der Literatur dokumentierten Fallbeispielen	115
6.1.1	Luftheizungen	115
6.1.2	Fußbodenheizungen	119
6.1.3	Bankheizungen	121
6.1.4	Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte	124
6.2	Ergänzende Diskussion von in dieser Arbeit nicht direkt untersuchten Heizungssystemen	126
6.2.1	Wandtemperierung	126
6.2.2	Strahlungsheizung	129
6.3	Bewertungs- und Entscheidungshilfen	131
6.3.1	Kennwerte - Leistungsanforderungen	131
6.3.2	Bewertung des Raumklimas aus Sicht der Ausstattung	135
6.3.3	Bewertungskriterien für Heizungssysteme	135
6.4	Übersicht Heizungssystem	137
6.4.1	Luftheizung	137
6.4.2	Fußbodenheizung	140
6.4.3	Bankheizung	142
6.5	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	144
6.5.1	Die Ausstattung der Kirche	144
6.5.2	Die Nutzung der Kirche und Erwartungen der Kirchengemeinde	144
6.5.3	Das Ortsklima sowie Architektur und Größe der Kirche	145
6.5.4	Die bisher aufgetretenen Schäden	146
6.5.5	Abschließend	147
	Literaturverzeichnis	149
	Anhang	165
A	Anhang	165
A.1	h-x-Diagramm	165
A.2	Wasseraktivitäts-Diagramme	166
A.3	Bestimmung des sicheren Bereiches für die relative Feuchtigkeit nach DIN EN 15757:2008-02	168
A.3.1	Zielniveau der relativen Feuchtigkeit	168
A.3.2	Zielbereich der relativen Feuchtigkeit	168
A.4	Zuluftparameter sowie Verteilung von Zu- und Abluftgittern nach Schellen	170
A.4.1	Anzahl der Zuluft- und Abluftgitter	170
A.4.2	Zulufttemperatur	170
A.4.3	Zuluftgeschwindigkeit	171
A.5	Auflistung der verwendeten Meteoronorm Wetterdatensätze	172
B	Anhang Situationsanalyse	173
B.1	Fragebogen	173
B.2	Kurzportraits der untersuchten Kirchen	180

C	Anhang Monitoring	183
C.1	Kurzportraits der untersuchten Kirchen	183
C.1.1	Evangelische Kirche Bozen	183
C.1.2	Franziskanerkirche Bozen	184
C.1.3	Pfarrkirche Branzoll (1)	185
C.1.4	Pfarrkirche Branzoll (2)	186
C.1.5	Dom zu Brixen	186
C.1.6	Pfarrkirche Dorf Tirol	188
C.1.7	Pfarrkirche Gais	189
C.1.8	Kirche zum hl. Anton in Kaltern	190
C.1.9	Pfarrkirche Karneid	191
C.1.10	Pfarrkirche Kuens	192
C.1.11	Pfarrkirche Laag	193
C.1.12	Pfarrkirche Lüsen	194
C.1.13	Pfarrkirche Neumarkt	195
C.1.14	Pfarrkirche Penon	196
C.1.15	Pfarrkirche Prad	197
C.1.16	Pfarrkirche Prettau	198
C.1.17	Pfarrkirche Pufels	199
C.1.18	Pfarrkirche St. Magdalena in Gsies	200
C.1.19	Pfarrkirche St. Martin in Gsies	201
C.1.20	Pfarrkirche St. Martin in Thurn	202
C.1.21	Pfarrkirche St. Pankraz	203
C.1.22	Pfarrkirche St. Pauls	204
C.1.23	Pfarrkirche Sarnthein	205
C.1.24	Pfarrkirche Schenna	206
C.1.25	Pfarrkirche Terlan	207
C.1.26	Pfarrkirche Tschengels	208
C.1.27	Pfarrkirche Vals	209
C.1.28	Pfarrkirche Vilpian	211
C.2	Vollständige Kennwerttabelle	212

Kurzfassung

Das Beheizen historischer Kirchen ist eine stete Gratwanderung: für die Besucher soll im Aufenthaltsbereich ein gewisser Komfort erreicht werden, während sich die Kosten in Grenzen halten und Schäden an der wertvollen Ausstattung wie z.B. gefassten Holzaltären, Orgeln und Fresken vermieden werden sollen. Dass dies nicht trivial ist, zeigen die vielfältig in der Literatur dokumentierten Schadensfälle: Schwärzung an den Wänden, Salzausblühungen, abblätternde Fassung seien nur beispielhaft genannt.

Eine „beste Lösung“ für alle Kirchen gibt es nicht, sehr wohl aber können Kriterien aufgestellt werden, die den Entscheidungsprozess für eine konkrete Kirche unterstützen - das zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, die neben Raumklimamessungen in 28 Kirchen und dynamischer Simulation auch ein ausführliches Literaturstudium umfasst.

Die typischen Temperaturverläufe der untersuchten Heizungs-systeme sowie deren Kennwerte (z.B. Temperaturprofil, Oberflächentemperatur, Feuchteminima und -schwankungen) zeigen, dass nur für die Gottesdienste aktivierte Luftheizungen wohl am schadensträchtigsten sind, während Luftheizungen mit Grundtemperierung, Fußbodenheizungen und Bankheizungen jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben.

Mit Hilfe von CFD-Simulation konnten nicht nur unterschiedlicher Heizungssysteme unter ansonsten gleichen Randbedingungen miteinander verglichen werden - was in der Realität in der Regel nicht möglich ist - sondern auch am Fallbeispiel der Pfarrkirche von Branzoll gezeigt werden, was das Instrument für die planerische Praxis leisten kann.

Während generelle Leistungsanforderungen (formuliert auf Grundlage von Literatur und eigenen Untersuchungsergebnissen) den Rahmen für Planung und Betrieb einer Kirchenheizung geben, zeigt die Schadenstabelle auf, für welche Ausstattungskategorien welche Raumklimaparameter prioritär betrachtet werden müssen und Bewertungsmatrizen der einzelnen Heizungssysteme deren Stärken und Schwächen. Denn „Beheizung“ ist nicht notwendigerweise gleichzusetzen mit „Schädigung“ der Kirche und ihrer Einrichtung. Durchdachte, sinnvolle Beheizung kann dazu beitragen, die jahreszeitlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auszugleichen, und damit zur Erhaltung beitragen. Eine Lösung muss für jede einzelne Kirche neu gefunden werden, je nach ihrem bisherigen Raumklima, ihrer Größe, Lage, Häufigkeit der Nutzung und schützenswerten Einrichtung.

1. Einleitung

„Kirchenheizung - ja und? Das kann doch nicht so schwierig sein. Und letztendlich ist es wohl nur eine Kostenfrage!“, ist so mancher wohl geneigt zu sagen. Bei näherer Betrachtung zeigt sich das Problem in seiner Vielschichtigkeit: Neben den Kosten gilt es auch der Behaglichkeit und der Denkmalpflege Rechnung zu tragen. Und sogar rein monetär gedacht gilt: Was nützt eine relativ kostengünstig beheizte Kirche, wenn es statt in den Bänken vor allem hoch oben im Gewölbe warm ist, und zudem Altäre, Orgel und Fresken unter der Beheizung leiden, und damit die Kosten für die Restaurierungsarbeiten steigen?

Der Planer einer Kirchenheizung kann nur sehr bedingt auf seine Erfahrungen aus dem Wohn- und Industriebau zurückgreifen, da sich Kirchen - und in dieser Arbeit seien darunter solche alter Bauart verstanden - von Wohn- und Industriebauten nicht nur in Größe und Proportionen, in den Baumaterialien und Nutzerbedürfnissen unterscheiden, sondern vor allem auch in der oft wertvollen Ausstattung, welche die Eingriffsmöglichkeiten einschränkt und unter einer Veränderung des Raumklimas leiden kann:

Risse im Holz, abblätternde Farbfassung, geschwärztes Gewölbe, Salzteppiche am Fresko, Schimmel und Algen am Gemäuer, Schwämme unter dem Bankspiegel, feuchte Mauersockel - das alles sind Schäden, die mit der Beheizung der Kirche zusammenhängen können. Fatalerweise ist es sogar möglich, dass die gesunkene relative Luftfeuchtigkeit der erwärmten Luft die Holzausstattung, wie z.B. den Altar, zum Schwinden und dessen Farbfassung zum Abblättern bringt, während gleichzeitig am kalten Gemäuer die von den Besuchern eingebrachte und aus dem Holz verdunstete Feuchtigkeit kondensiert, und damit das Verschmutzen der Wände fördert, oder sogar Salze aktiviert.

Der folgende geraffte Überblick zum Stand der Forschung gibt einen ersten Einblick in den Umgang mit der Problematik der Beheizung von Kirchen, in den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Themen dann detaillierter beleuchtet.

1.1 Literatur zu Kirchenheizung

Im Laufe der letzten hundert Jahre haben sich Ingenieure, Architekten und Naturwissenschaftler sowie Denkmalpfleger und Restauratoren wiederholt mit dem Thema Kirchenheizung befasst, je nach räumlichem und zeitlichem Umfeld mit dem Blick auf unterschiedliche Aspekte.

In den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts stand die Dimensionierung der Anlage im Vordergrund, unterschiedliche Kirchenheizungsformeln wurden entwickelt, etwa von Metzkwow [Metzkwow, 1924], Kori [Kori, 1924], von Gröber und Sieler [Gröber, 1934; Gröber u. Sieler, 1935; Sieler, 1938] sowie etwas später von Krischer und Kast [Krischer u. Kast, 1957].

In den 60er Jahren wurden zum einen Umsetzungsbeispiele für Kirchenheizungen veröffentlicht und verschiedene Heizungstypen durchwegs technisch-positivistisch diskutiert [Krätz, 1961; Kanne, 1964, 1966; Ende, 1966; Franz, 1966; Stoy, 1966; Schmidt, 1968], zum anderen tauchte aber auch die Frage nach möglicherweise durch die Kirchenheizung verursachten Schäden auf [Hennings, 1966], unter anderem in Bezug auf Orgeln [Schlieder, 1967; Supper, 1967].

Von da an wird das Thema Kirchenheizung meist in Zusammenhang mit möglichen Schäden betrachtet: Kirchenheizung ist beispielsweise das Thema der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten 1972 in Mainz, deren Ergebnisse in „Das Münster“ veröffentlicht wurden [Schotes, 1972; Stadtmüller, 1972; Gossens, 1972; Jenisch, 1972; Rüngeler, 1972; Schmidt-Thomsen, 1973; Mainz, 1973]. Eine Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft [Wegner, 1972] betrachtet die Kirchenheizung im Sinne einer vorbeugenden Restaurierung und beschreibt qualitativ die Eigenschaften unterschiedlicher Heizungssysteme. Axel Pfeil vergleicht in seiner Dissertation [Pfeil, 1975] die verschiedenen Kirchenheizungsformeln, zeigt Strömungsbilder für unterschiedliche Heizungstypen und unterstreicht die Wichtigkeit einer Berücksichtigung des Feuchtehaushaltes in der Planung. Der 1981 erschienene Band 5 der Restauratorenblätter widmet sich in mehreren Beiträgen der Kirchenheizung und damit verbundenen Problemen [Bauer, 1981; Beck u. Koller, 1981; Dulosy, 1981; Egger, 1981; Klummer, 1981; Koller, 1981; Oellermann, 1981]. Zehn Jahre später ist Kirchenheizung erneut Thema - im Rahmen der Tagung „Erhalten von historischen Bauten“ vom 23. bis 24. 1991 in Köln, deren Beiträge als VDI-Bericht veröffentlicht wurden [Verein Deutscher Ingenieure, 1991].

Claus Arendt veröffentlicht ab Mitte der 70er Jahre mehrere Artikel in Fachzeitschriften sowie Informationsschriften im Auftrag des Bayrischen Landesamtes für Denkmalpflege zum Thema Kirchenheizung [Arendt, 1976a,b, 1983a, 1986, 1989; Arendt u. Hausladen, 1992], in welchen er die verbreitetsten Heizungssysteme beschreibt sowie deren Vor- und Nachteile. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik führt er eine groß angelegte Studie mit dem Monitoring von über 30 Kirchen durch, deren Ergebnisse in [Künzel u. Holz, 1992] und [Arendt, 1993] umfassend dargestellt werden. Letztere ist die wohl umfassendste Publikation zum Thema Kirchenheizung im deutschen Sprachraum.

In Italien ist es die Gruppe um Dario Camuffo, die sich intensiv mit dem Raumklima in Kirchen und dessen Auswirkung auf das wertvolle Inventar auseinandersetzt; unter anderem wurde eine Reihe prominenter Objekte untersucht, wie z.B. die Sixtinische Kapelle, die Giotto-Kapelle in Padua, die Basilika St. Maria Maggiore in Rom, die Frari Basilika in Venedig und der Dom von Orvieto. In [Camuffo, 1998] beschreibt der Autor detailliert die Physik der einzelnen mit dem Raumklima in Verbindung gebrachten Schadensmechanismen, gibt Empfehlungen für das „richtige“ Klima, und geht auch speziell auf das Beheizen von Kirchen ein.

Nach der oben zitierten Dissertation von Axel Pfeil sind es vor allem drei weitere, die sich mit dem Thema Kirchenheizung auseinandersetzen: Mit der relativen Feuchtigkeit, deren Absorption in Baumaterialien und damit verbundenen Schäden, speziell auch am Beispiel von Kirchen, befasst sich Tim Padfield [Padfield, 1998]. Henk Schellen stellt die in der Literatur vorhandenen Anforderungen an Temperatur, Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit tabellarisch zusammen und erarbeitet auf deren Basis und aufgrund eigener Forschungsergebnisse Anforderungstabellen für unterschiedliche Heizungssysteme sowie eine Checkliste für Auswahl und Auslegung des geeigneten Heizungssystems [Schellen, 2002]. Er beschreibt unterschiedliche numerische Simulationsprogramme und Modelle zur Vorhersage des Raumklimas in Kirchen und versucht anhand einer Reihe von Fallbeispielen typische Fragen zu beantworten. Limpens-Neilen [2006] schließlich untersucht in ihrer Dissertation im Rahmen des EU-Projektes „Friendly Heating“ die Weiterentwicklung einer Bankheizung, sowohl experimentell in der Klimakammer als auch mit Hilfe dynamischer Simulation. Besonderes Augenmerk legt sie auf die Bewertung der erreichbaren Behaglichkeit.

Seit den 90er Jahren werden auch wieder spezifische Heizungssysteme diskutiert, so z.B. die Unterflurheizung in [Ensink, 1994] und Gasinfrarotstrahler in [Clasen, 1991; Kämpf u. Clasen, 1995]. Viel - und sehr kontrovers - diskutiertes Thema ist die sogenannte Mauertemperierung. Von der zum Teil verwirrend unphysikalischen Information, die online kursiert, sei hier abgesehen und vielmehr auf den das System bewertenden Artikel von Arendt u. Hausladen [1992] verwiesen, sowie auf die z.B. in [Kilian u. a., 2007; Kotterer u. a., 2004; Šijanec Zavrl u. a., 2006] publizierten Mess- und Untersuchungsergebnisse, die in ihrer Gesamtheit ein halbwegs abgerundetes Bild über die Möglichkeiten und Grenzen des Systems zeichnen.

Im Rahmen des EU-Projektes „Friendly Heating“ wurde der Versuch gemacht, eine Kirchenheizung zu entwickeln, die kompatibel zu denkmalpflegerischen Anforderungen ist. In der abschließenden Publikation von Camuffo [2007] stellen die Autoren zum einen die bei der Wahl des Heizungssystems zu berücksichtigenden Aspekte dar, zum anderen formulieren sie qualitative Bewertungen für unterschiedliche Heizungssystemen.

Zusätzlich zu den hier aufgezählten Arbeiten, welche sich spezifisch mit Kirchenheizung auseinandersetzen, sind selbstverständlich auch jene von Bedeutung, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Schäden und Raumklima beschäftigen, da sie die Beurteilung des Raumklimas in der Kirche aus denkmalpflegerischer Sicht ermöglichen. Hier sei jedoch auf das Abschnitt 2.3 verwiesen.

1.2 Aufbau und Methodik dieser Arbeit

Dieser Arbeit liegen die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Kirchenheizung - eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege“¹ zugrunde. Im Rahmen des Projektes wurden (i) die vorhandene Literatur zum Thema im Detail analysiert, (ii) anhand von Lokalausganschein in 31 Kirchen die Situation in Südtirol (Italien) erhoben, (iii) daraufhin in 28 (zum Großteil nicht denselben) Kirchen die Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung über einen Zeitraum von jeweils mindestens 4 Wochen aufgenommen und analy-

¹welches an der Europäischen Akademie Bozen (Italien) in Zusammenarbeit mit dem Denkmalamt der Autonomen Provinz Bozen sowie der Landesagentur für Umwelt und Arbeitsschutz der Autonomen Provinz Bozen und mit finanzieller Unterstützung der Stiftung Südtiroler Sparkasse durchgeführt wurde

siert, und parallel dazu (iv) am Rechner verschiedene Varianten simuliert, um schlussendlich Leitlinien für die Planung von Kirchenheizungen ausarbeiten zu können.

Dementsprechend gliedert sich die Arbeit:

Kapitel 2 arbeitet die drei Aspekte der Gratwanderung heraus:

- die Behaglichkeit, welche sich nicht auf die Lufttemperatur reduzieren lässt, in den allermeisten Fällen der Anlass für den Einbau einer Heizung ist, aber zum einen dennoch oft nicht erreicht wird und zum anderen als Ziel nicht unumstritten ist;
- die Kosten, welche je nach Heizungssystem und vor allem Betriebsweise stark variieren;
- die Denkmalpflege, welche so unterschiedliche Anforderungen an das Raumklima stellt, wie die zu erhaltenden Objekte vielfältig sind - in ihren Materialien, Dimensionen und ihrer Vergangenheit.

Kapitel 3 zeichnet ein Bild der Kirchenheizungs-Situation in Südtirol. Im Rahmen von Lokalaugenscheinen wurde jeweils die Veränderung des Raumklimas vor und während eines Gottesdienstes aus der Sicht eines Besuchers aufgezeichnet, Heizungssystem und Heizraum wurden erfasst und besichtigt und, soweit vorhanden, Bau- und Betriebskosten analysiert.

Kapitel 4 stellt die Ergebnisse der experimentellen Raumklimauntersuchung vor: Mit jeweils bis zu 25 Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren wurden 28 Kirchen im 5-Minuten-Intervall über einen Zeitraum von jeweils mindestens 4 Wochen vermessen. Anhand dieser Messdaten wurden zum einen typische Verläufe für die vier untersuchten Heizungstypen (Bankheizung, Fußbodenheizung, instationäre Luftheizung und Luftheizung mit Grundtemperierung) bestimmt, zum anderen wurden Kennwerte berechnet, anhand derer erstens die vier untersuchten Heizungstypen verglichen, und zweitens Unterschiede innerhalb der Kirchen mit Luftheizung untersucht wurden. An Beispielen werden schlussendlich einige spezielle Probleme verdeutlicht, die in der Praxis auftreten.

Kapitel 5 beleuchtet die Möglichkeiten, welche sich durch die numerische Simulation des Raumklimas in Kirchen ergeben: Dieses Instrument ermöglicht die Berechnung von Temperaturverteilung und Raumströmung in einer Kirche unter definierten Rahmenbedingungen, und damit auch die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Parameter am Rechner - eine Untersuchung, die durch Messen am konkreten Objekt so nicht möglich ist, da man dort in der Regel weder das Heizungssy-

stem ändern kann noch versuchsweise die Fenster isolieren oder Ähnliches mehr. Am Beispiel der Pfarrkirche in Branzoll wird die Simulation als Hilfsmittel für die Planung vorgestellt sowie deren Qualität anhand der experimentellen Raumklimauntersuchung vor und nach dem Einbau des neuen Heizungssystems evaluiert.

Kapitel 6 setzt die Ergebnisse der Untersuchung an der Europäischen Akademie Bozen (EURAC) in Bezug zu anderen wissenschaftlichen Publikationen und formuliert Leitlinien für die Auswahl des jeweils bestmöglichen Kirchenheizungssystems.

Im Anhang finden sich zum Teil weiterführende Informationen zu im Kapitel 2 angesprochenen Themen, außerdem detaillierte Informationen zur Situationsanalyse in Südtirol, wie z.B. der Fragebogen, und nicht zuletzt die Porträts der im Kapitel 4 dargestellten Kirchen sowie die vollständige Kennwerttabelle.

2. Gratwanderung

Die Anforderungen, welche an die Heizung eines Gotteshauses gestellt werden, sind vielfältig: Warm soll es sein, aber nicht zu viel kosten, möglichst einfach zu bedienen und praktisch unsichtbar, gleichmäßig temperiert für die Orgel, aber nicht zu trocken wegen der Holzaltäre. Will man all diesen - zum Teil gegensätzlichen - Ansprüchen gerecht werden, ist die Realisierung der Heizanlage im wahrsten Sinne des Wortes eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege.

Während in den Kapiteln 3 bis 6 verschiedene Kirchenheizungen verglichen und besprochen werden, geht es hier zuerst darum, die Kriterien zu bestimmen, anhand derer sie beurteilt werden.

2.1 Behaglichkeit

In den allermeisten Fällen ist der Wunsch nach „Behaglichkeit“ der Anlass für Einbau und Betrieb einer Heizung in einer historischen Kirche, allerdings wird sie trotz Heizung nicht immer erreicht, und ist obendrein als Ziel auch nicht unumstritten.

So betont etwa Arendt [1976a], der Ausdruck „Kirchenheizung“ wecke die falsche und bei Kirchen alter Bauart vor allem auch gefährliche Vorstellung einer beheizten Kirche; es solle aber nicht in erster Linie das Gebäude beheizt werden, sondern die Kirchenbesucher sollen nicht frieren. Laut Schmidt-Thomsen [1973] reizte der technische Fortschritt, der die Beheizung von Kirchen erst möglich machte, das Komfortbedürfnis immer mehr an, sodass, wie Schmidt [1968] beschreibt, den Kirchgängern um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert Temperaturen von 6 bis 8°C genügten, in den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts schon 10 bis 12°C verlangt wurden, heute (AdA i.e.1968) 12 bis 15°C üblich seien, mitunter auch schon 16 bis 18°C gefordert würden.

In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts hat sich als Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Ansprüchen ein relativ breiter Konsens zu Grundtemperierung auf 8°C und langsames Aufheizen für die Gottesdienste auf 12 bis 15°C gebildet, wie er auch in die von den Diözesanbaumeistern und Baure-

ferenten erarbeiteten „Richtlinien für die Beheizung von Kirchen“ [Mainz, 1973] eingegangen ist. Unter anderem beruht diese gemeinsame Position auf der Annahme, dass die Gläubigen den Mantel in der Kirche nicht abnehmen (u.a. [Gossens, 1972]), und Temperaturen von 12 bis 15°C infolgedessen als behaglich empfunden werden.

Allerdings gibt es sehr wohl auch wärmere Kirchen: Beispielsweise spricht Krätz [1961] von dauerhaften 20°C in der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche. In einer vom Sonntagsblatt [1996] veröffentlichten Diskussion zur Zumutbarkeit von 16°C führen die Befürworter vor allem die Energie- und Kosteneinsparung sowie denkmalpflegerische Vorteile ins Feld, während Gegner in der vorgeschlagenen Temperatur die „kalte Kirche“ auch im übertragenen Sinne sehen und feststellen, dass es gut sei, dass man in Deutschland die Kirchen am Sonntagvormittag auf Zimmertemperatur zu halten pflege, weil man ja die Leute erreichen wolle mit der Botschaft.

Beispiele für warme Kirchen bringen auch skandinavische Publikationen: Olstad u. Haugen [1997] sprechen von 20°C während der Gottesdienste in der Kaupanger-Kirche in Norwegen, Larsen [2002] von 18°C in den in Dänemark untersuchten Kirchen - kritisiert dies allerdings als zu hoch und streicht heraus, die Kirchgänger müssten lernen, den Mantel anzubehalten, denn er glaube, kommende Generationen würden uns hart verurteilen, wenn wir damit fortführen, Bequemlichkeit über Vernunft zu setzen, und das Kulturerbe in Kirchen verloren gehen ließen.

Schlussendlich wird es wohl, wenn aus denkmalpflegerischer Sicht keine Einschränkungen bestehen, die Entscheidung einer jeden Pfarrgemeinde sein, wie warm die Kirche über welchen Zeitraum sein soll: Eine Wallfahrtskirche wird eher durchgehend geheizt als die Kirche einer kleinen Pfarrei, welche vom Pfarrer der Nachbargemeinde mit betreut wird. Als Beitrag zu Diskussion mag die Beobachtung dienen, dass beim Montieren der Messgeräte in der Pfarrkirche von Terlan ((im Rahmen des in Kapitel 4 beschriebenen Projektes), welche kontinuierlich auf 10-12°C geheizt wird, während dieser drei Stunden an einem Werktag-Vormittag immer Besucher in der Kirche war, gerade so als ob die Einwohner beim Einkaufen auch einmal auf einen Sprung die Kirche besuchten.

2.1.1 Beurteilungskriterien

Für die Beurteilung der Behaglichkeit kommt es nicht nur auf die Lufttemperatur an, wie der von Schlieder [1967] in einer Kirche durchgeführter Versuch zeigt:

„Bei einer Außentemperatur von -7°C und einer Innentemperatur von 1°C wurde die Kirche mit hoher Ausblasttemperatur (80°C) in kurzer Zeit (3 Stunden) auf 20°C aufgeheizt. Die Temperatur der Sitzbänke wurde nach Erreichen der Raumtemperatur von 20°C mit 2.8°C gemessen. Von der Kirchendecke herab wurden mehrere Thermometer bis in Augenhöhe beim Sitzen herabgelassen. Es wurden nunmehr mehrere Personen gebeten, in den Bänken vor den Thermometern Platz zu nehmen. Auf Befragen beim Betreten der Kirche war die einstimmige Meinung: Es ist zu warm. Bereits nach 5 Minuten wurden von den beiden älteren Versuchspersonen die Mäntel, die beim Hinsetzen geöffnet wurden, wieder geschlossen und als Sitzunterlage benutzt. Nach weiteren 5 Minuten sah der erste der beiden Älteren auf das Thermometer vor seinem Gesicht und schüttelte den Kopf, gleich darauf der zweite. Nach weiteren 8 Minuten folgten die Jüngeren. Die allgemeine Meinung: Es ist zu kalt, die Thermometer stimmen nicht. Der Versuch war damit beendet und wurde in der darauffolgenden Woche wiederholt: Bei einer Außentemperatur von -5°C beim Einschalten der Heizung und einer Innenraumtemperatur von 2.3°C wurde die Kirche mit einer Ausblasttemperatur von 38°C zwei Tage lang ununterbrochen geheizt, der Raumthermostat wurde auf 15°C eingestellt und plombiert. Bei Beginn des Versuches betrug die Außentemperatur -8°C , die Innentemperatur 16°C , die Sitzbanktemperatur 14.5°C . Die Versuchspersonen waren diesmal andere, und es wurden aus der Erfahrung des ersten Versuches heraus vier ältere Personen und nur zwei jüngere ausgewählt. Der Eindruck beim Betreten der Kirche: „Es ist angenehm“ oder „Es geht“. Nach 30 Minuten konnte der Versuch abgebrochen werden, weil keine der sechs Versuchspersonen irgendwelche Reaktionen gezeigt hat. Die Thermometer wurden erst näher betrachtet, als der Versuch dann erläutert wurde. Man blieb bei der Meinung, es sei angenehm warm gewesen.“

3	heiß
2	warm
1	leicht warm
0	neutral
-1	leicht kühl
-2	kühl
-3	kalt

2.1.2 ISO 7730: the Predicted Mean Vote PMV

Eine Möglichkeit, die Behaglichkeit in Zahlen zu fassen, ist der von Fanger [1970] entwickelte PMV (Predicted Mean Vote), der auch in die Norm ISO 7730 [DIN EN ISO 7730:1995, 1995] Eingang gefunden hat. Er geht davon aus, dass wir zufrieden sind, wenn wir mit der Umgebung im thermischen Gleichgewicht stehen, und berechnet unter Einbeziehen von Luft- und Umschließungsflächentemperatur, Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit, aber auch von Kleidung und Tätigkeits-

Abbildung 2.1: Beurteilungsskala für die Behaglichkeit nach Fanger [1970] und [DIN EN ISO 7730:1995, 1995]

grad, einen Wert zwischen -3 (kalt) und 3 (heiß), wie in Abbildung 2.1 aufgeführt.

Als „behaglich“ definiert die Norm PMV-Werte zwischen -0.5 und +0.5, die einem Anteil von 10% Unzufriedenen entsprechen. Für die in Kirchen übliche Winterbekleidung mit einem Isolationswert von 2clo (typische europäische Bürokleidung und schwere Jacke) und einen Betätigungsgrad von 1met (entspanntes Sitzen, 58W/m², also etwa 100W/Person) ergibt sich aus den Tabellen ein Behaglichkeitsbereich von 16°C±4°C. Rechnet man umgekehrt den PMV-Wert für eine bestimmte Raumtemperatur unter den gegebenen Randbedingungen aus, so ergeben sich die in Tabelle 2.1 hinterlegten Werte. Der Einfluss des Tätigkeitsgrades kommt auch in der Beobachtung der Autorin zum Ausdruck, dass beim Montieren der Messgeräte (im Rahmen der in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen) der Mantel nicht nötig war, während er im Sitzen - so sie vom Gottesdienst „überrascht“ wurde, und nicht durch Herumgehen stören wollte - sehr schnell schmerzlich vermisst wurde.

Raumtemperatur	8°C	10°C	12°C
PMV	-1.61	-1.28	-0.96
PMV für wärmere Kleidung (2.5clo)	-0.89	-0.63	-0.35
PMV für mehr Bewegung (70W/m ² - entspanntes Stehen oder sitzende Tätigkeit)	-0.94	-0.67	-0.41

Tabelle 2.1: PMV für unterschiedliche Temperatur, Kleidung und Tätigkeitsgrad

Allerdings wurde der PMV für übliche Wohn- und Büroraumklimata entwickelt, in Kirchen befinden wir uns hingegen am Rande seines Gültigkeitsbereiches: Laut Norm ist der PMV-Index für Lufttemperaturen zwischen 10°C und 30°C, Strahlungstemperaturen zwischen 10°C und 40°C und Luftgeschwindigkeiten bis zu 1m/s anwendbar. Außerdem gilt der PMV für stabile Bedingungen, in guter Annäherung noch für kleinere Schwankungen eines oder mehrerer Parameter.

2.1.3 Zwei-Knoten-Modell für transiente Energiebilanz

Viazzo [2000] hat in ihrer Arbeit zur Beurteilung eines Kirchgangs (10' zu Fuß zur Kirche, 45' Gottesdienst, 10' zu Fuß nach Hause, Aufenthalt zu Hause) das von Gagge u. a. [1986] entwickelte und in ASHRAE [1993] eingegangene Zwei-Knoten-Modell für die transiente Energiebilanz herangezogen. Dieses unterscheidet zwischen Körper-Kerntemperatur und Temperatur der Hautschicht, welche über die Wärmeregulationsmechanismen des Körpers zusammenhängen. Metabolismus und Atmung beeinflussen die Kerntemperatur, Konvektion und Strahlung wirken sich auf die Hauttemperatur aus. Äquivalent zum PMV werden die beiden Temperaturen aus Luft- und Umschließungsflächentemperatur, Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit, Kleidung und Tätigkeitsgrad berechnet, und dann in einen Skalenwert von -5 bis 5 (siehe Abbildung 2.2), die empfundene Temperatur TSENS, umgesetzt.

5	unerträglich heiß
4	sehr heiß
3	heiß
2	warm
1	leicht warm
0	neutral
-1	leicht kühl
-2	kühl
-3	kalt
-4	sehr kalt
-5	unerträglich kalt

Abbildung 2.2: Beurteilungsskala für die Behaglichkeit mit TSENS nach [ASHRAE, 1993]

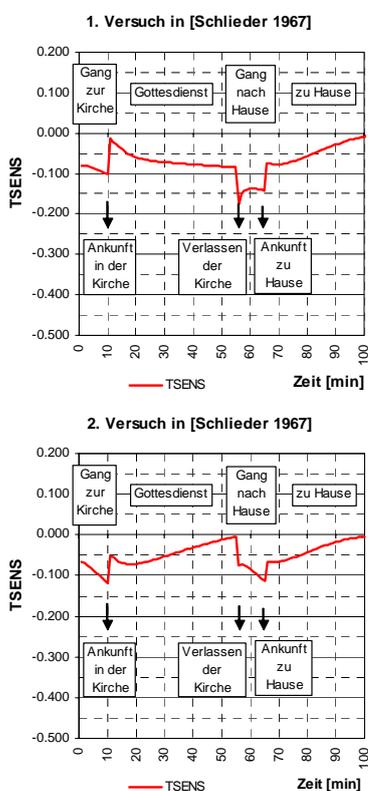


Abbildung 2.3: Verlauf von TSENS für die beiden von Schlieder durchgeführten Versuche (vgl. S. 11)

Angewandt auf die Versuche von Schlieder ergibt sich der folgende Verlauf von TSENS (siehe Abbildung 2.3): In beiden Fällen sinkt TSENS bei Verlassen des Hauses deutlich ab, steigt dank der durch die Bewegung erzeugten Wärme aber rasch wieder an. Beim Betreten der Kirche ist der Metabolismus anfangs noch auf Touren, das thermische Empfinden steigt sprunghaft an, um dann (a) im ersten Versuch rasch wieder abzufallen, da die niedrigere innere Wärmeproduktion im Sitzen die Wärmeverluste durch Strahlung, Konvektion und Atmung nicht ausgleichen kann, und der Körper langsam auskühlt, (b) im zweiten Versuch hingegen mehr oder weniger konstant zu bleiben, da sich Wärmeproduktion und -abgabe dank der deutlich höheren operativen Temperatur die Waage halten, und die mittlere Körpertemperatur sogar wieder ansteigt.

2.2 Kosten

Eine Kirche zu beheizen (oder, richtiger, zu temperieren) verursacht auf mehrfache Art und Weise Kosten:

- Zu Beginn stehen die Anschaffungskosten der Anlage,
- denen die jährlichen Betriebskosten folgen - welche die sowohl eigentlichen Energiekosten als auch die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Anlage einschließen,
- und zu guter Letzt müssen auch die Kosten für die Renovierung von Schäden, die durch die Heizung verursacht werden, berücksichtigt werden.

Für eine kostenwahre Beurteilung der Heizung müssen alle drei Posten betrachtet werden. Allerdings kann es im konkreten Fall zu unterschiedlichen Gewichtungen kommen, da unter Umständen Zuschüsse für die Anschaffung, Sonderkonditionen beim Wärmeliefervertrag oder Ähnliches mehr gewährt werden.

Ein Beispiel zur Verdeutlichung: Es kostet im Allgemeinen mehr Energie, einen Kirchenraum durchgehend zu temperieren, als die Raumluft nur kurzfristig für die Gottesdienste aufzuheizen. Gleichzeitig braucht es für durchgehende Beheizung jedoch eine wesentlich kleinere Anlage, die deutlich weniger kostet. Außerdem kann die Kirchentemperatur insgesamt niedriger gehalten werden: Besucher empfinden dank ähnlicher Luft- und Oberflächentemperaturen schon niedrigere Temperaturen als angenehm (vgl. oben beschriebener Versuch von Schlieder [1967]). Für relativ oft genutzte Kirchen kann es unter diesen Gesichtspunkten durchaus auch aus finanzieller

Sicht sinnvoll sein, durchgehend zu heizen.

2.2.1 Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten hängen sehr stark von den jeweiligen Gegebenheiten in der einzelnen Kirche ab, sind jedoch in der Regel günstiger für Systeme, die mit weniger baulichen Eingriffe verbunden sind. Mit zu berücksichtigen sind hier auch die Kosten für ggf. zu errichtenden Heizraum und Brennstofflager. Schellen [2002] bewertet die Anschaffungskosten für unterschiedliche Heizungssysteme qualitativ von niedrig bis hoch (siehe Tabelle 2.2). Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kirchenheizungen schwankten in ihren Anschaffungskosten zwischen 10'000 Euro und 80'000 Euro, wenn man von den teureren Fußbodenheizungen absieht (Details in Abschnitt 3.4.2, S. 57).

Um die Anschaffungskosten mit den Betriebskosten vergleichen zu können, wird entweder die Investition in jährliche Raten über die Anlagenlebensdauer umgerechnet, oder die Betriebskosten über die gesamte Anlagenlebensdauer werden auf ihren Barwert bei Installation umgerechnet. Eine solche Rechnung für die in Abschnitt 3.4 untersuchten Kirchen zeigt, dass die Betriebskosten in allen Fällen mindestens zwei Drittel der gesamten Kosten ausmachen.

2.2.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten setzen sich aus den Energiekosten und den Wartungs- und Instandhaltungskosten zusammen. Letztere schließen Kosten für Reparaturen, Kaminkehrer, Filteraustausch, ggf. nötige jährliche Kontrollen etc. ein. Sie variieren von Heizungssystem zu Heizungssystem, sind bei strom- und gasbetriebenen Systemen tendenziell geringer als bei Öl und Festbrennstoffen [Bordass u. Bemrose, 1996]. Bei den in Abschnitt 3.4.1 betrachteten Fällen, für welche Informationen zu den Wartungs- und Instandhaltungskosten vorlagen, beliefen sich diese auf 2% bis 6% der jährlichen Betriebskosten.

Die Betriebskosten hängen also im Wesentlichen vom Energiebedarf für das Heizen ab - und dieser wiederum für eine bestimmte Kirche nicht nur von den Außentemperaturen, sondern auch vom zu erreichenden Temperaturniveau und der Heizweise. Im Rahmen einer Parameteruntersuchung wurden der Wärmebedarf einer Kirche und seine Abhängigkeit von Außenklima, Temperaturniveau und Heizweise mit Hilfe des dynamischen Simulationsprogrammes TRNSYS untersucht und in [Troi, 2000g] vorgestellt:

Anschaffungskosten für Heizungssysteme

niedrig	Infrarotstrahler
eher niedrig	Wärmeluftheizung mit wenigen Ein- und Auslässen
durchschnittlich	lokale Bankheizung, Konvektoren, Heizkörper
hoch	Fußbodenheizung

Tabelle 2.2: Qualitative Bewertung der Anschaffungskosten nach [Schellen, 2002]

Als Basisvariante diene eine eher kleine Kirche: 20m lang, 9m breit und ebenso hoch, die Bauweise ähnlich wie in Abschnitt 5.1.1. Steht eine Kirche dieser Größe in Bruneck (Italien) mit 3640 Heizgradtagen, so benötigt man etwa 5'300 Liter Öl, um sie konstant auf 10°C zu heizen. Dieselbe Kirche in Bozen (Italien) mit 2570 Heizgradtagen würde dagegen nur 3'500 Liter benötigen, während man in Wolkenstein in Gröden (Italien) mit 5060 Heizgradtagen 7'300 Liter Öl verheizen würde - also mehr als das Doppelte wie in Bozen.

Ein Heruntersetzen der Raumtemperatur auf 8°C würde den Verbrauch in der kleinen Kirche in Bozen um 900 Liter auf 2'600 Liter Öl senken. Ein Erhöhen der Temperatur auf 12°C dagegen hätte einen Verbrauch von 4'500 Liter Öl zur Folge. Bei 13°C benötigt man mit 5'200 Litern doppelt soviel Heizöl wie bei 8°C. Dieselbe Betrachtung für Wolkenstein lässt die absoluten Unterschiede noch größer werden: 8°C Raumtemperatur ziehen den Verbrauch von 5'800 Liter Öl nach sich, das sind 1'500 Liter weniger als bei 10°C. Für 12°C muss man sogar mit 9'000 Litern rechnen, also 1'700 Litern mehr als bei 10°C. Bezogen auf den Verbrauch bei 10°C ist der Unterschied im härteren Klima jedoch etwas kleiner als in Bozen.

Wird die Temperatur nachts auf 6°C abgesenkt, ergibt sich mit einem Verbrauch von 3'200 Litern Öl im Vergleich zu den 3'500 Litern bei stationärer Beheizung eine Einsparung von 300 Litern. Heizt man nachts überhaupt nicht, braucht man sogar nur mehr 3'000 Liter Öl, allerdings sinkt die Temperatur so weit ab, dass man, um die Kirche am nächsten Morgen wieder aufzuheizen, fast die doppelte Leistung braucht (d.h. einen doppelt so großen - und entsprechend teureren - Kessel).

Beschränkt man die Zeit mit 10°C auf 7-17 Uhr und senkt die Temperatur in der übrigen Zeit auf 6°C, ist ein Verbrauch von 2'800 Litern zu erwarten. Heizt man nur morgens von 6-10 Uhr auf 10°C und hält die Temperatur im Übrigen auf 6°C, verringert er sich weiter auf 2'400 Liter Öl. Schaltet man die Heizung in der Zeit vor 6 Uhr und nach 10 Uhr überhaupt aus, braucht man sogar nur 1'400 Liter Öl. Allerdings kühlen in diesem Fall die Wände soweit aus, dass mit beträchtlicher Zugluft zu rechnen ist, und zudem steigt die zu installierende Leistung aufs Doppelte.

Der Einfluss der Nutzungstemperatur und der Betriebsweise (instationär, stationär und mit Temperierung auf eine Grundtemperatur 4K unter der Nutzungstemperatur) bei unterschied-

	2Go/Tag	1Go/Tag	5Go/Woche	2Go/Woche
Mo	5 ³⁰ -10	6-8	-	-
Di	5 ³⁰ -10	6-8	6-8	-
Mi	5 ³⁰ -10 13-15	6-8 13-15	6-8 13-15	13-15
Do	5 ³⁰ -10	6-8	6-8	-
Fr	5 ³⁰ -10	6-8	-	-
Sa	5 ³⁰ -10 17-19	16-19	16-19	16-19
So	6-10 17-19	7-10	7-10	7-10

Tabelle 2.3: Mit TRNSYS simulierte Nutzungsvarianten: Während der angegebenen Zeiten regelt die Heizung auf die Nutzungstemperatur. Go=Gottesdienst.

licher Nutzungshäufigkeit wurde des Weiteren für eine mittelgroße Kirche (40m lang, 10m breit, 15m hoch) im Detail untersucht, indem in einer Reihe von insgesamt 36 Simulationen jeweils ein Parameter verändert wurde. Tabelle 2.3 listet die untersuchten Nutzungsvarianten auf. In Abbildung 2.4 wird deutlich, dass bei häufiger Nutzung und moderater Nutzungstemperatur bei instationärem Heizen mehr Energie benötigt wird bei Halten einer Grundtemperatur.

2.2.3 „Folgekosten“

Das häufige Stimmen der Orgel, das Ausmalen der Kirche in immer kürzeren Abständen, die Restaurierung des Freskos oder des gefassten Altars, das sind Kosten, die nicht immer, aber doch in einer großen Zahl von Fällen der Heizung oder ihrer Betriebsweise angelastet werden können.

Dass Schäden an der wertvollen Ausstattung des Kirchenraumes nicht nur Kosten verursachen, sondern so mancher Schaden nicht wieder gut gemacht werden kann, und damit Kulturgut unwiederbringlich verloren geht, braucht hier nicht extra betont zu werden. Um diesen dritten Aspekt der Gratwanderung geht es im nächsten Abschnitt.

2.3 Denkmalpflege

„Denkmalschutz und Denkmalpflege haben die Aufgabe, Geschichte für die Gegenwart anschaulich zu machen und für die Zukunft erkennbar zu erhalten“, sei an dieser Stelle die Denkmalfibel des bayrischen Kultusministeriums zitiert [Schiedermaier u. Scherg, 1991]. Zur Denkmalpflege gehört auch die Bewahrung von alten Kirchen in ihrer ursprünglichen Form, die Erhaltung historischer Fresken und Orgeln, Altäre, Bilder und Statuen.

Abgesehen davon, dass der Einbau eines Heizungssystems

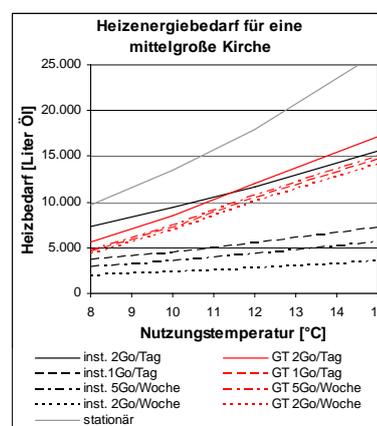


Abbildung 2.4: Energiebedarf in einer mittelgroßen Kirche (40m lang, 10m breit, 15m hoch) in Abhängigkeit der Nutzungstemperatur bei (i) unterschiedlicher Betriebsweise: instationär, stationär und Temperierung auf eine Grundtemperatur 4K unter Nutzungstemperatur, (ii) unterschiedlicher Nutzungshäufigkeit (siehe Tabelle 2.3)
 Go=Gottesdienst, inst=instationär, GT=Grundtemperierung.

selbst einen mehr oder weniger starken Eingriff in die historische Substanz bedeutet (Verlegung von Leitungen, Durchbrüche in Wänden, Aufnehmen des Bodens, Ausschachtungen für Luftkanäle, siehe auch [Arendt, 1993]), ist es vor allem das veränderte Innenraumklima, welches mit den zu erhaltenden Objekten interagiert. Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchtigkeit - und zwar sowohl die jahreszeitlich bedingten „natürlichen“, als auch die durch die Heizung „künstlich“ verursachten - lösen bei Orgeln, Holzaltären und Fresken unterschiedliche Reaktionen aus. Ebenso haben die absoluten Werte von Feuchtigkeit und Temperatur - seien sie hoch oder niedrig - Einfluss auf das wertvolle Inventar, können z.B. Schimmel und Algenbefall begünstigen oder verhindern. Luftströmungen und Turbulenzen sind maßgeblich beteiligt an der Ausbreitung und Ablagerung von verschiedensten Partikeln an Oberflächen.

Dennoch ist „Beheizung“ nicht notwendigerweise gleichzusetzen mit „Schädigung“ der Kirche und ihrer Einrichtung. Durchdachte, sinnvolle Beheizung kann dazu beitragen, die jahreszeitlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen auszugleichen, und damit zur Erhaltung beitragen. Eine Lösung muss für jede einzelne Kirche neu gefunden werden, je nach ihrem bisherigen Raumklima, ihrer Größe, Lage, Häufigkeit der Nutzung und schützenswerten Einrichtung.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über Schadensmechanismen und die Ansprüche verschiedener Materialien und Objekte an das Raumklima.

2.3.1 Holz und Fassung

Holz strebt - wie andere hygroskopische Materialien, z.B. Papier, Pergament, Leinwand, Stuck oder Lehm - je nach Temperatur und vor allem relativer Feuchtigkeit der umgebenden Luft einer ganz bestimmten Feuchte zu, und nimmt dazu Wasser aus der Luft auf oder gibt es an diese ab. Die Feuchte des Holzes wird in Prozent des Gewichtes enthaltenen Wassers auf das Gewicht des darrtrockenen Holzes angegeben. Sie kann deshalb bei mit Wasser getränktem Holz auch weit über 100% liegen. Für Holz, bei dem sich ein Gleichgewicht mit der umgebenden Luft eingestellt hat, liegt sie in der Regel zwischen 4 % und 20 % (für 20°C und 30 % - 80 % Luftfeuchte). Abbildung 2.5 (nach Leisse [2002]) zeigt, dass die sich einstellende Holzfeuchte im niedrigen Temperaturbereich bis etwa 30°C nur geringfügig von der Temperatur, aber stark von der Luftfeuchte abhängt. Auf eine Reduktion der Luftfeuchte

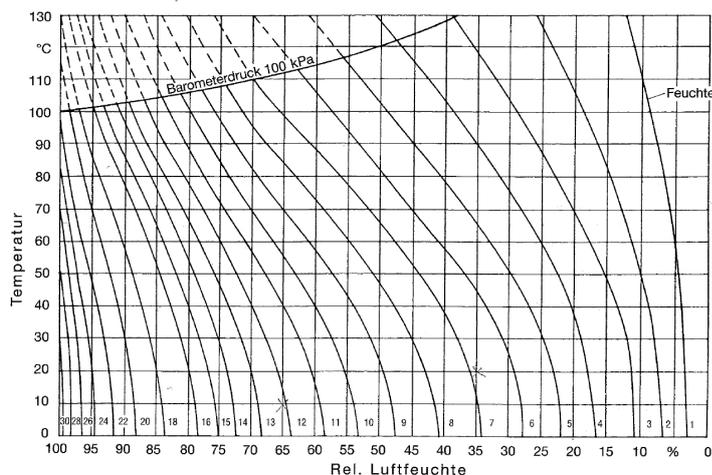


Abbildung 2.5: Hygroskopisches Gleichgewicht von Holz (am Beispiel Sitka-Fichte) in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchtigkeit, aus [Leisse, 2002]

te von 65 % auf 35 % (z.B. durch Aufheizen im geschlossenen Raum von 10°C auf 20°C) würde Fichtenholz mit einer Reduktion der Gleichgewichtsfeuchte um über 5 %, von etwas über 12 % auf knapp unter 7 %, reagieren.

Mit der Veränderung des Wassergehaltes einher geht eine Volumenänderung des Holzes: Es schwindet beim Trocknen und quillt, wenn es Wasser aufnimmt. Im obigen Beispiel würde das Holz um 1.1 % in radialer Richtung und 2.1 % in tangentialer Richtung schwinden (Daten nach Leisse [2002]). In longitudinaler Richtung verändert sich das Holz hingegen kaum. Die Veränderung ist außerdem nicht über den gesamten Feuchtebereich gleich: Im mittleren Bereich, zwischen 40 und 60 %, ist sie am geringsten, während sie sowohl zu niedrigen als auch zu hohen Feuchtigkeiten hin deutlich zunimmt, wie Abbildung 2.6 am Beispiel von Fichte und Eiche zeigt.

Neben der hygroskopisch bedingten Dimensionsänderung kann beim Holz allerdings auch noch eine - wiewohl in ihren absoluten Werten kleinere - temperaturbedingte Dimensionsänderung auftreten. Da Änderungen von Temperatur und relativer Feuchtigkeit der Luft in Räumen in der Regel gegenläufig sind, sind es auch die beiden Effekte der Dimensionsänderung.

Holz reagiert auf Änderungen der Temperatur und relativen Feuchtigkeit sehr rasch. Anhand der Untersuchung einer unbeheizten Holzkirche in Polen zeigt Kozłowski [2000], dass das Holz die Schwankungen der relativen Feuchtigkeit, die außen im Tageszyklus durchaus 60 % erreichen, fast vollständig ausgleicht: Die relative Feuchtigkeit im Inneren der Kirche

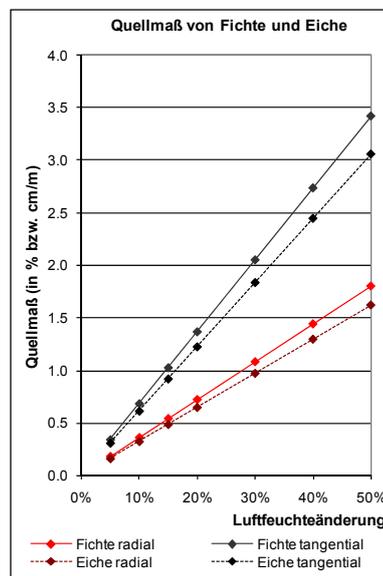


Abbildung 2.6: Quell- bzw. Schwindmaß von Holz in Abhängigkeit der Änderung der Luftfeuchte (am Beispiel von Fichte und Eiche), nach Daten von [Leisse, 2002]

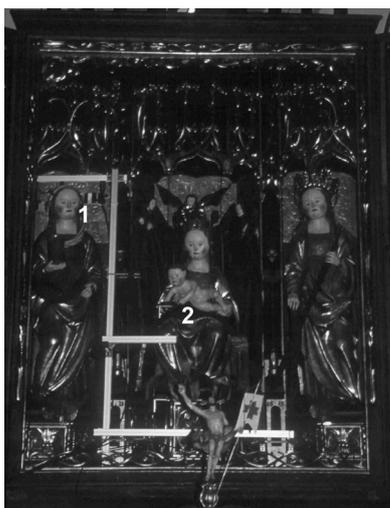


Abbildung 2.7: Altarfigur in der Kirche zur hl. Maddalena in Rocca Pietore (Italien), die im Rahmen des EU-Projektes Friendly Heating [Camuffo, 2007] untersucht wurde (aus [Bratasz u. a., 2007]).

schwankt im Tageszyklus nie um mehr als 10 % - damit einher geht eine messbare Volumenänderung des Holzes, die dem Verlauf der relativen Feuchtigkeit im Raum ohne Zeitverzögerung folgt. Auch der - frei bewegliche - Finger einer Figur des Hochaltars von Rocca Pietore (im Rahmen des EU-Forschungsprojektes Friendly Heating [Camuffo, 2007] untersucht) reagiert auf die Beheizung der Kirche mit Warmluft ohne Zeitverzögerung, wie Bratasz u. a. [2007] darlegen: mit einer kurzfristigen Längenzunahme infolge der in kürzester Zeit von 5 auf 20°C ansteigenden Temperatur, die innerhalb kürzester Zeit durch das dominierende Schwinden infolge der von 54 % auf 27 % gesunkene relative Luftfeuchtigkeit überlagert wird (Abbildung 2.8, links).

Die Dimensionsänderung ist für das Holz an und für sich kein Problem - solange diese nicht eingeschränkt ist. Ist das Holz in seiner Bewegung gehemmt, kann es zu starken Spannungen kommen, die zu bleibenden Deformationen und schließlich Rissen im Material führen können [Bratasz u. a., 2005]. Bei komplexen Holzkonstruktionen wie Orgeln, Kanzeln und Altären, in denen Hölzer in unterschiedlicher Faserrichtung miteinander verbunden sind, sind solche Einschränkungen praktisch immer präsent. Sie können aber auch im Inneren des Holzes auftreten, wenn zum Beispiel beim Trocknen eines massiven Holzzylinders das ausgeprägte tangentielle Schwinden durch die weit geringere radiale Änderung nicht ausgeglichen werden kann [Jakięła u. a., 2007a].

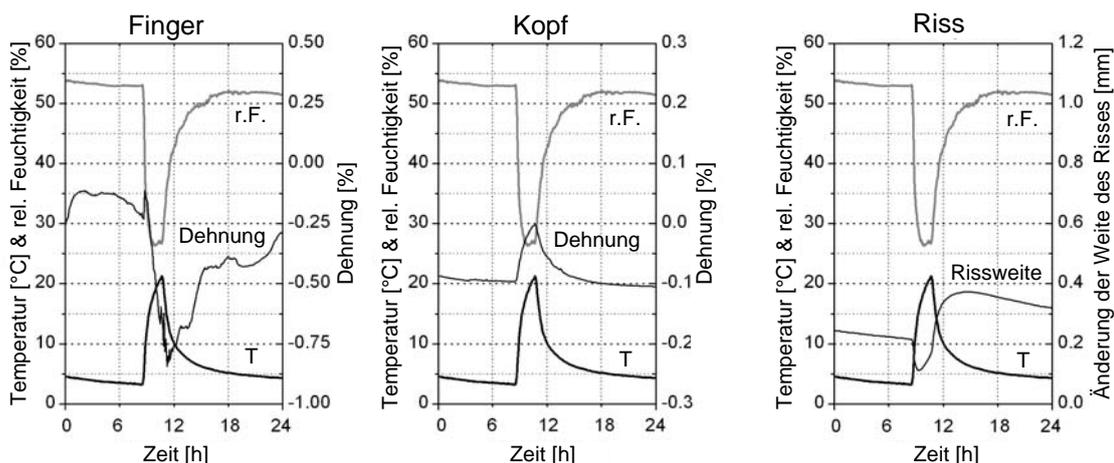


Abbildung 2.8: Reaktion unterschiedlicher Messstellen an ein und derselben Figur (siehe Abbildung 2.7) auf die von der Luftheizung verursachten ausgeprägten Feuchtigkeits- und Temperaturspitzen (aus [Bratasz u. a., 2007])

Besonders stark tritt das Problem der „inneren“ Spannungen durch schnelle und starke Feuchtigkeitsabfälle bei massiven Holzobjekten auf: in diesem Fall trocknet nur eine äußere Schicht

von wenigen Millimetern aus, und der noch feuchtere, gequollene Kern widersetzt sich dem Schwinden dieser äußeren Schicht. Es kommt zu starken Spannungen und schlussendlich zu Rissen (siehe Abbildung 2.9). Deutlich erkennbar ist dieses Phänomen am Kopf derselben Figur des Altars in Rocca Pietore, deren Finger oben beschrieben wurde: Der Kopf zeigt eine schnelle Reaktion auf den Temperaturanstieg beim Heizen (der Durchmesser nimmt zu) aber praktisch kein Schwinden (Abbildung 2.8, Mitte). Der Riss im Kopf, der ebenfalls vermessen wird, schließt sich im ersten Augenblick, öffnet sich aber deutlich, sobald die äußeren Millimeter Holz trocknen und zu schwinden suchen (2.8, rechts). In Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Mechanismen folgen sowohl Kopf als auch Finger im Langzeitverhalten, wenn genügend Zeit für die Ausgleichsvorgänge vorhanden ist, den Schwankungen der relativen Feuchtigkeit [Bratasz u. a., 2007].

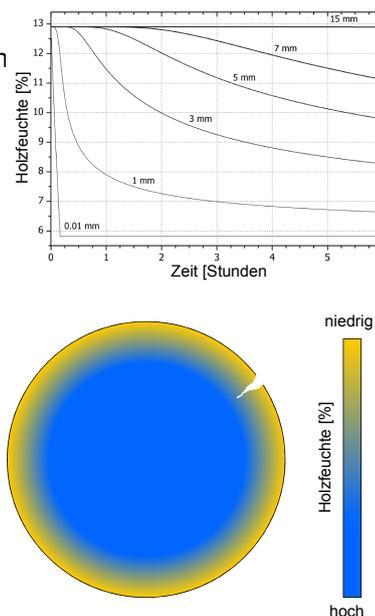


Abbildung 2.9: Schadensmechanismus bei massiven Holzobjekten durch kurzzeitige, ausgeprägte Feuchtigkeitsabfälle, nach Kozłowski u. Bratasz [2003]

Außerdem haben die Messdaten gezeigt, dass bei wiederholten Schwankungen Kumulationseffekte im Sinne einer irreversiblen Veränderung auftreten, z.B. der Riss nicht mehr um dieselbe Öffnungsbreite schwankt, sondern sich irreversibel weiter öffnet. Bratasz u. a. [2007] betonen deshalb, dass sowohl die Amplitude als auch die Frequenz schadensträchtiger Luftparameterschwankungen betrachtet werden müssen.

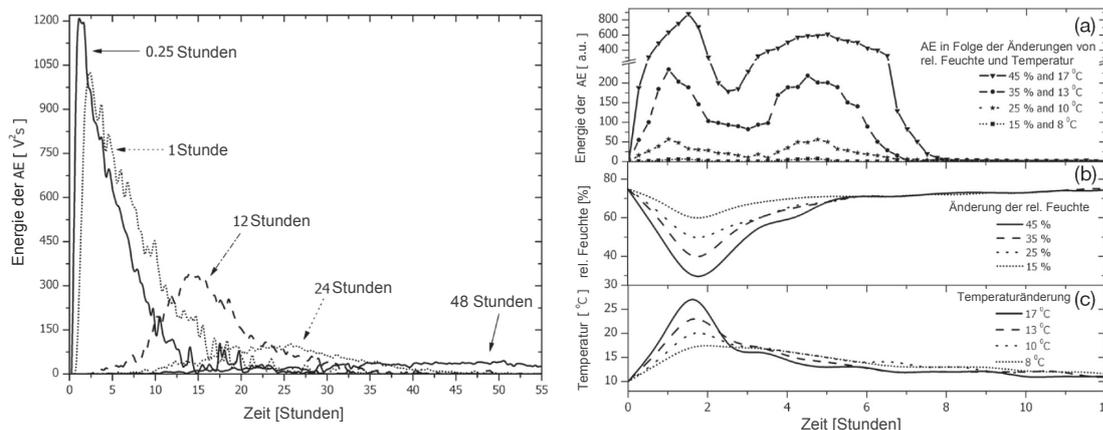


Abbildung 2.10: Links: Energie der Akustischen Emissionen (AE) für einen - unterschiedlich schnell ablaufenden - Einbruch der relativen Feuchtigkeit von 70% auf 30%. Rechts: Energie der AE (a) während einer im Labor mit unterschiedlichen Amplituden für rel. Feuchtigkeit (b) und Temperatur (c) simulierten Heizperiode (aus [Jakiela u. a., 2007a])

Auch die Messung der „akustischen Emissionen“ (AE), die ein Maß für die Schadensentwicklung im Holz sind, unterstreichen, dass die Schadensträchtigkeit von Schwankungen der relativen Feuchtigkeit (i) umso größer ist, je rascher sie ablaufen (Abbildung 2.10, links), und (ii) außerdem stark von der Amplitude abhängen (Abbildung 2.10, rechts): Unter 25% Än-

derung kam es zu keiner nennenswerten AE-Aktivität.

Mit Hilfe von Simulationen lassen sich die oben beschriebenen Mechanismen in „Schadensrisiko-Karten“ umsetzen. Für die Karten in Abbildung 2.11 haben Jakiela u. a. [2007b] einen massiven Holzzylinder mit 100 mm Durchmesser angesetzt - also ein typisches Maß für Figuren und insbesondere deren Kopf. Die Karten zeigen auch deutlich, dass es nicht allein auf die Amplitude der Schwankung ankommt, sondern auch auf den Wert, um den die relative Feuchtigkeit schwankt.

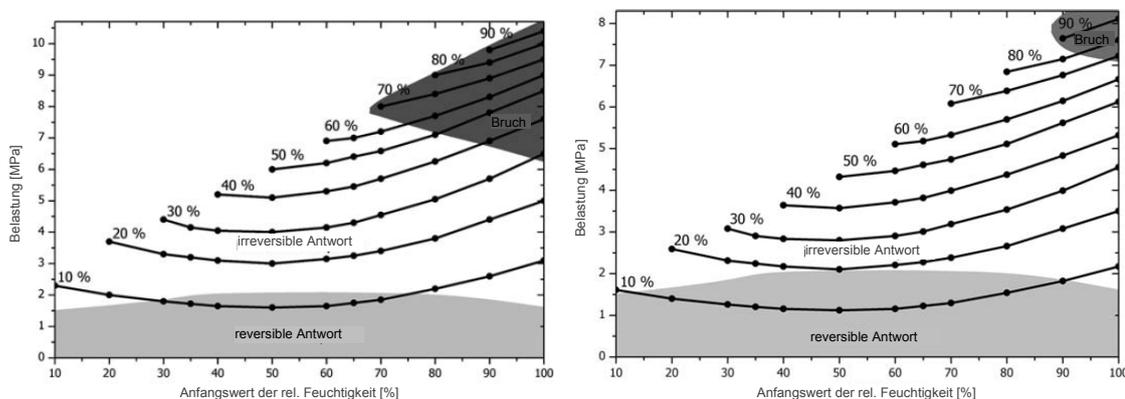


Abbildung 2.11: Während bei abrupten Feuchtigkeitsänderungen (links) bereits Schwankungen von 10-15 % zu möglicherweise bleibenden Deformationen und solche von 40 %, so sie von einer hohen Ausgangsfeuchte über 90 % ausgehen, zum Riss führen können, drohen bei Tageszyklen (rechts) vor allem bleibende Deformationen (aus [Jakiela u. a., 2007b]).

Besonders gefährdet durch - insbesondere wiederholte - Feuchtigkeitsschwankungen, sind bemalte oder gefasste Holz- und Leinwandobjekte. Die unterschiedlichen Schichten, vom Substrat aus Holz oder Leinwand über Leim und Kreidegrund bis zu Öl- und Temperafarben, Wachsen und Lack, reagieren jeweils unterschiedlich auf Änderungen von Temperatur und Feuchtigkeit, es kommt also bei jeder größeren Änderung zu Spannungen in und zwischen den Materialien. Mecklenburg u. a. [1998] haben sowohl die Eigenschaften der einzelnen Materialien als auch von deren Kombinationen untersucht und die Schadensmechanismen detailliert beschrieben, von denen die für diese Arbeit wesentlichsten im Folgenden kurz zusammengefasst sind. Bei Leinwandbildern, die mit Leim geschichtet sind, spielt dessen ausgeprägtes Quellschwindverhalten die dominierende Schadensrolle. Bei Holz als Grundlage bestimmt dieses im Wesentlichen die Dimensionsänderung - und wegen seiner Anisotropie wird die Farbfassung unter Umständen in die eine Richtung gedehnt und in die andere gestaucht. Abbildung 2.12 zeigt links, dass sich ein Kreidegrund (mit etwa 60 % PVC - pigment volume concentration) deutlich weniger dehnt und schwindet als Holz. Je grö-

Je höher der Füllstoffanteil, desto steifer und weniger dimensionsändernd ist der Kreidegrund. Zusammen mit dem Holzsubstrat bedeutet das: Zu Rissen in Kreidegrund und Farbschicht kommt es zum einen, wenn sich die Tafel aufgrund eines starken Anstiegs der relativen Feuchtigkeit ausdehnt - die Risse verlaufen dann parallel zur Faserrichtung, denn das Holz dehnt sich quer dazu stärker aus als Kreidegrund und Farbschicht, diese werden gedehnt (Abbildung 2.12, rechts „A“). Es kann aber umgekehrt auch bei extremen Austrocknungs-Ereignissen zu Rissen kommen - dann quer zu Faser, denn während der Kreidegrund schwindet, ändert das Holz seine Länge in longitudinaler Richtung praktisch nicht (Abbildung 2.12, rechts „B“). Während starker Austrocknung kann es zudem parallel zur Faserrichtung zum Aufstellen von Bäuchen und Kanten kommen, da die Farbschicht durch die (tangential) schwindende Holzunterlage gestaucht wird (Abbildung 2.12, rechts „C“).

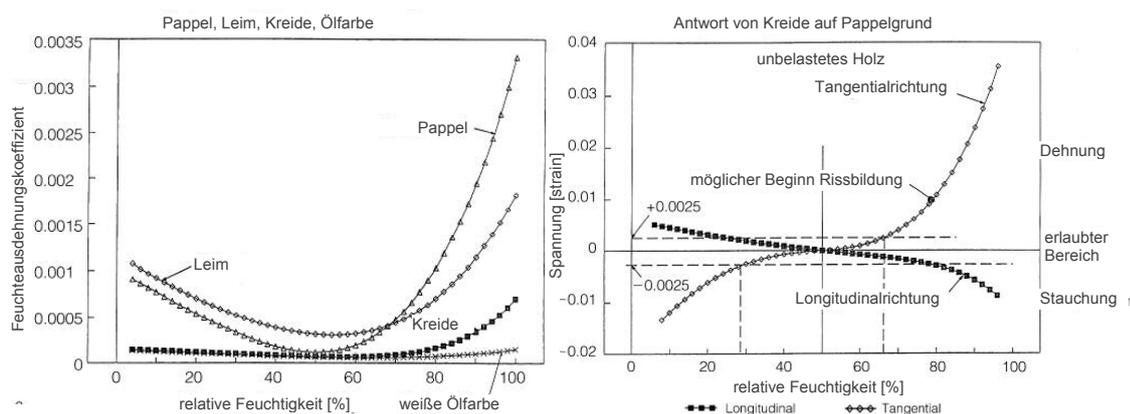


Abbildung 2.12: Links: Feuchteausdehnungskoeffizient für Pappel, Leim, Kreidegrund und Ölfarbe. Rechts: von Ausgangsfeuchte 50 % berechnete kombinierte Dehnung und Stauchung für Kreidegrund auf Pappel in Faserrichtung und quer dazu, aus [Mecklenburg u. a., 1998]

Im Abschlussbericht des EU-Projektes Friendly Heating [Cammuffo, 2007], und auch von Bratasz u. a. [2007] wird eindringlich auf das fragile Gleichgewicht hingewiesen, das sich im Laufe der Jahrhunderte zwischen dem typischen Raumklima und dem Objekt einstellt: durch bleibende Verformungen und interne Risse, die einen gewissen Bewegungsspielraum ermöglichen, passt sich das Objekt den Umgebungsbedingungen an, die Alterung des Materials und der Verlust von dessen Elastizität machen diese Anpassungen irreversibel - das Objekt kann sich an neuerlich geänderte Bedingungen nicht mehr anpassen. Insbesondere wenn sich hygroskopische Objekte auf sehr hohe bzw. niedrige Feuchtigkeiten eingependelt haben, ist eine Rückkehr zu mittleren Werten nicht ohne Schäden möglich - das Holz erreicht durch die in den Ex-

trembereichen weit größeren Ausdehnungskoeffizienten sehr schnell die Reißgrenze [Mecklenburg u. a., 1998]. Im Klartext: Ein Altar der lange in sehr feuchter Umgebung gelagert wurde, wird Schaden tragen, wenn er in „Museums-klima“ kommt.



Abbildung 2.13: Detail einer Glasmalerei aus dem 14. Jh (Wells, Cathedral of St Andrew). Die ins Glas geätzten Korrosionslöcher, Korrosion an Glas und Bleirute und Ablagerungen sind in der von außen gemachten Auflichtaufnahme deutlich zu erkennen [Rauch, 2004]

Dass es in der Regel mehr darum geht, das sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte eingestellte Gleichgewicht nicht zu verändern, als darum, „Museumsbedingungen“ zu schaffen, betont nicht nur Arendt [1993], sondern zeigt eingängig auch Schlieder [1967]: Eine Umfrage bei Orgelbauern in Deutschland ergab, dass die für Orgeln als optimal bezeichnete relative Feuchtigkeit erstaunlich deutlich mit dem üblichen Klima in der jeweiligen Region übereinstimmt - die angegebenen Werte schwankten zwischen 50 % und 80 %, wobei höhere Werte relativer Luftfeuchtigkeit vor allem für Küstengegenden angegeben wurden.

2.3.2 Glas und Metall

Die aus Glasstücken mosaikartig zusammengesetzten und in Bleiruten gefassten farbenprächtigen historischen Kirchenfenster wurden im Mittelalter - in der Regel beidseitig - zusätzlich mit eingebrannter Schwarzlot- und Halbtonbemalung ausgeschmückt ([Frenzel, 1981; Bernardi u. a., 2006; Korn, 1993]). Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Gläser änderte sich im Laufe der Zeit - und entsprechend auch deren Haltbarkeit Umwelteinflüssen gegenüber: Die Korrosionsanfälligkeit der Farbgläser ist in der Regel geringer bei Gläsern mit relativ hohem Schmelzpunkt (Renaissancegläser sind am resistentesten, gefolgt von romanischen, dann gotischen und zuletzt den Gläsern des 18. Jh.). Fast konträr zur Korrosionsanfälligkeit verhält sich die Haftfestigkeit der Schwarzlot- und der Halbtonbemalung: Liegt der Erweichungspunkt des Grundglases wesentlich über dem des Schwarzlotes, so kommt es zu keiner homogenen Verbindung - entsprechend beobachtet man bei Renaissancegläsern kaum korrodierte Farbgläser aber schlecht erhaltene Schwarzlotbemalung [Frenzel, 1981].

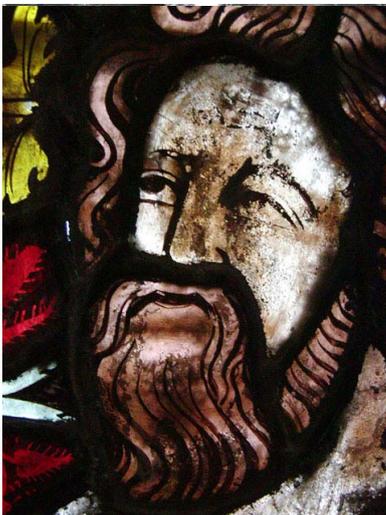


Abbildung 2.14: Detail einer Glasmalerei aus dem 14. Jh (Wells, Cathedral of St Andrew). Die ins Glas geätzten Korrosionslöcher und der teilweise Verlust originaler Farblinien sind in der von innen gemachten Durchlichtaufnahme deutlich zu erkennen [Rauch, 2004]

Die beobachtbaren Schäden reichen von der Ausbildung von Korrosionsschichten und Wetterstein über Loch- und Flächenfraß sowie abblätternde und abmehlende Bemalung bis zu Opakisierung und Verbräunung [Bernardi u. a., 2006; Frenzel, 1981; Marschner, 1993; Drachenberg u. Müller, 1993]. Insbesondere durch die unterschiedliche Verwitterungsdynamik von unbemaltem Glas und Schwarzlot kann es zu aparten Schadensbildern kommen, bei denen ursprünglich unbe-

malte, helle Partien dunkel oder gar opak werden, die Konturen hingegen nach Verlust der Schwarzlotkontur transparent [Korn, 1993]. An der Außenseite sind die Schäden in aller Regel größer, aber auch an der Innenseite sind sie nicht zu vernachlässigen [Mayer, 1981; Drachenberg u. Müller, 1993; Frenzel, 1993a].

Angriff von Feuchtigkeit an der Oberfläche ist der erste Schritt zur Glaskorrosion: Die Grundreaktion ist ein Ionenaustausch, welcher zu einer hydratisierten Kieselgelschicht führt, die wenige Alkali-Ionen, aber viele Protonen und Wasser enthält (siehe Abbildung 2.15). Die schwer löslichen Abbauprodukte an der Oberfläche bilden zunächst eine Schutzschicht [Drachenberg u. Müller, 1993], allerdings betont Römich [2004b], dass mit dicker werdender Kieselgelschicht, thermischer und hygrischer Stress Mikrorisse erzeugen kann, durch welche schädliche Substanzen weiter ins Glas eindringen und den Korrosionsprozess vorantreiben. Durch die Reaktion der ausgewaschenen Alkalien mit Schwefelsäure (SO_2 aus der Atmosphäre und Kondens- oder Regenwasser) kommt es außerdem zur Ausbildung des so genannten Wettersteins (in der Regel Gips oder Syngenit), der - insbesondere in lockerer, poröser Form - hygroskopisch ist und bei ungünstig hoher Umgebungfeuchte zusätzlich Wasser an der Oberfläche hält [Drachenberg u. Müller, 1993; Frenzel, 1993a]. Marschner [1993] unterstreicht, dass nach der der Initiierung des Verwitterungsprozesses durch die chemischen Vorgänge der Auslaugung, die mechanische Komponente, die durch Temperatur- und Feuchtigkeitszyklen angetrieben wird, dominiert: Erweiterungen der Mikrorisse durch wiederholte Lösungsvorgänge und Reaktionssalze, Quellen und Schwinden, sowie damit verbundene Dehnung und Stauchung durch die eingeschränkte Beweglichkeit etc.

Die Opakisierung von Glas, auch oft als Verbräunung oder Verschwärzung bezeichnet, ist auf die Einlagerung einer filmdünnen opak-schwarzbraunen Eisen- und Manganoxyeinlagerung in einer mikrorissdurchsetzten Zone unterhalb der intakt erscheinenden Glasoberfläche zurückzuführen [Drachenberg u. Müller, 1993; Marschner, 1993].

Die Bemalung ist grundsätzlich denselben Verwitterungsmechanismen wie das Grundglas ausgesetzt, da Schwarzlot im Wesentlichen auch aus Glas besteht. Im Allgemeinen ist Schwarzlot etwas widerstandsfähiger als das Grundglas, wirkt also in einer ersten Phase als Schutzschicht; allerdings kann es, z.B. bei mangelhafter Lotzusammensetzung, Brennfeh-

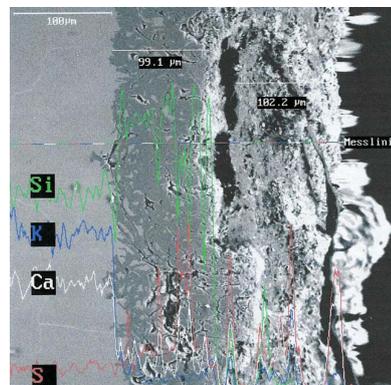


Abbildung 2.15: Mit Elektronenmikroskop aufgenommener Querschnitt eines mittelalterlichen Glases (Erfurter Dom, ca. 1403-1405) mit (von links nach rechts) Glaskern, hydratisierter Schicht und Korrosionskruste, aus [Rauch, 2004]

lern etc., auch vor dem Grundglas verwittern. Die weiter oben beschriebenen aparten Schadensbilder sind die Folge [Korn, 1993].

Die oben zitierten Autoren sind sich dahingehend einig, dass Wasser an der Glasoberfläche die treibende Kraft für die Glaskorrosion ist, und bringen etliche Beispiel dafür, dass auch der Schwitzwassereintrag an der Fensterinnenseite genügt, um die Schadensprozesse auszulösen und in Gang zu halten. Insbesondere mahnen Frenzel [1981, 1993b,a]; Drachenberg u. Müller [1993]; Korn [1993] die durch Beheizung von Kirchen ausgelösten häufigen Kondensationsereignisse an den Fenstern als den kältesten Oberflächen an. Um Schäden an historischen Kirchenfenstern zu verhindern, gilt es also in erster Linie, Kondensation zu vermeiden.

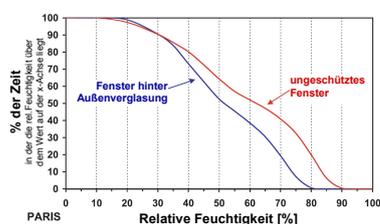


Abbildung 2.16: Summenhäufigkeit der relativen Feuchtigkeit in unmittelbarer Nähe der Glasoberfläche für ein ungeschütztes Fenster und ein Fenster hinter Außenverglasung, aus [Bernardi u. a., 2005]

Zyklische Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen, Luftverschmutzung (insbesondere SO_2 und NO_x), Staub und Mikroorganismen beschleunigen den Prozess [Römich, 2004b,a; Marschner, 1993; Frenzel, 1981; Cummings u. a., 1998], und sollen deshalb so gering wie möglich sein.

Schon Frenzel [1981] betont, dass es für die Restaurierung und Konservierung kein garantiert zuverlässiges Konzept gibt, und entsprechende Bedeutung der prophylaktischen Sicherung der Glasmalerei zukommt - durch Außenschutzverglasung ohne unmittelbaren Eingriff am Objekt, der er grundsätzlich korrosionsverzögernde Wirkung zuspricht. Nach einer jahrzehntelangen Diskussion um Vor- und Nachteile sowie ästhetische Aspekte gilt heute in Fachkreisen die „isotherme“ Verglasung, bei der ein modernes Glasfenster den Abschluss nach außen übernimmt und das historische Fenster komplett im Innenraum ist (unter Umständen sogar nach innen versetzt aufgehängt wird), als Lösung der Wahl für den Schutz historischer Glasmalereien [Pallot-Frossard u. a., 2005; Römich, 2004b; Bernardi u. a., 2006].

Nicht zuletzt konnte das multi-disziplinäre EU-Projekt VIDRIO die Vorteile aufzeigen und einige noch bestehende Zweifel ausräumen [Bernardi u. a., 2005; Pallot-Frossard u. a., 2005]: (a) Die Kondensationsgefahr am historischen Fenster sinkt, (b) die Zeiträume mit gefährlich hoher relativer Feuchtigkeit nehmen ab (siehe Abbildung 2.16), (c) Temperatursprünge und Höchsttemperaturen am historischen Glas werden verringert (bei richtiger Ausführung, i.e. genügender Hinterlüftung!), (d) die Verschmutzung im Luftspalt zwischen historischem Fenster und Schutzverglasung ist geringer als an der Innenober-

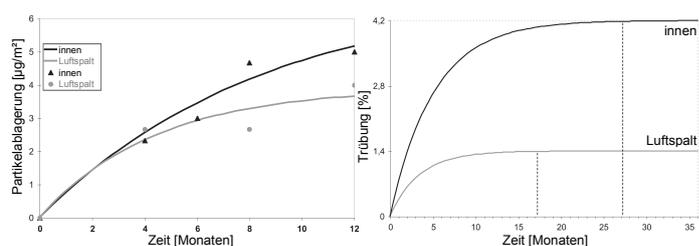


Abbildung 2.17: Ablagerung und Trübung durch Partikel an Innenoberfläche und im Luftspalt, aus [Lefèvre u. a., 2005]

fläche (siehe Abbildung 2.17), (e) SO_2 , O_3 und biologische Aktivität im Luftspalt entsprechen den Werten im Innenraum und sind wesentlich weniger aggressiv als außen.

Schäden an Metallobjekten sind in Kirchen in der Regel zum Glück kein zentrales Problem. Grundsätzlich gilt wie schon für Glas, dass Kondensation von Feuchtigkeit aus der Luft an metallenen Oberflächen der Korrosion derselben Vorschub leistet [Camuffo, 2007]. Da sowohl die spezifische Wärmekapazität als auch die Wärmeleitfähigkeit von Metallen vergleichsweise hoch sind, reagieren Objekte aus Metall auf Temperaturschwankungen im Raum erst mit deutlicher Verzögerung, und bilden damit leider bevorzugt kalte Flächen für Kondensation.

Orgeln stellen mit ihren Pfeifen das häufigste metallbezogene Erhaltungsproblem in Kirchen.

Erstens wird der Korrosion der Pfeifen in zweierlei Hinsicht durch raumklimatische Faktoren Vorschub geleistet: Zum einen kann durch Luftansaugungen in nicht in unmittelbarer Nähe der Orgel warme, feuchte Luft zu kalten Pfeifen gelangen, wo Feuchtigkeit dann kondensiert. Zum anderen emittiert Holz bei höherer Temperatur und Feuchtigkeit vermehrt korrosionsfördernde organische Säuren.

Zweitens neigen Blei-Zinn Pfeifen einerseits bei höheren Temperaturen vermehrt zum „Kriechen“ (engl. creep), das heißt zum langsamen „In-sich-zusammensacken“, andererseits steigt bei niedrigen Temperaturen die Gefahr der Zinnpest [Camuffo, 2007]

2.3.3 Schwärzen von Oberflächen



Abbildung 2.18: Zum Vergleich: verschmutzte (oben) und gereinigte (unten) Fläche am Deckenfresko in der Pfarrkirche von Martell

„Schwärzen“ bezeichnet im Allgemeinen die Ablagerung von Partikeln aus der Luft an Oberflächen. Da die Ablagerung die Raumschale, aber ebenso Ausstattungsstücke betrifft, und damit Objekte verschiedenster Art und unterschiedlichen Materials, wird das Phänomen in einem eigenen - nicht einem bestimmten Material zugeordneten Kapitel - beschrieben. Drei Fragen sind es, die im Zusammenhang mit geschwärzten Oberflächen gestellt werden müssen:

1.) Woher kommen die Partikel?

Zum einen von außen: Kirchen haben in der Regel einen gegenüber Wohngebäuden deutlich erhöhten Luftwechsel (Pfeil [1975] geht von 1- bis 2-fachem Luftwechsel je Stunde (LW/h) aus, Arendt [1993] zitiert als üblichen Planungswert 1 LW/h, den er jedoch in vielen Fällen für zu tief angesetzt hält, in Rocca Pietore wurden 1.3 bis 1.4 LW/h gemessen [Bratasz u. a., 2007], Schellen [2002] allerdings berichtet von einem gemessenen 0.1-fachen Luftwechsel für eine Kirche mit verputztem Steingewölbe und 0.5 - 0.75 LW/h bei Holzdecken). Außerdem bringen die Kirchenbesucher mit Schuhen und Kleidung Staub und Schmutz in die Kirche ein.

Zum anderen entstehen die Partikel aber auch in der Kirche selbst: Kerzen und Weihrauch sind eine nicht zu unterschätzende Schmutzquelle. Schellen [2002] berichtet allerdings von beträchtlichen Unterschieden in der Rußproduktion unterschiedlicher Kerzen (Abbildung 2.19). Aber auch Verwitterungsprodukte wie abmehlende Steine, Putze und Ähnliches finden sich in der Luft.

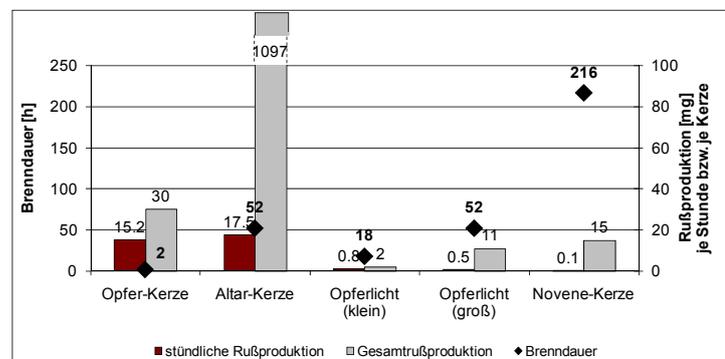


Abbildung 2.19: Quantitativer Vergleich von a) Brenndauer, b) stündlicher Rußproduktion und c) Gesamtrußproduktion für unterschiedliche Kerzen, aus [Schellen, 2002]

Die Größe der Partikel reicht von wenigen Nanometern bis

zu einigen Mikrometern, wie die Zitate in Abbildung 2.20 zeigen. Hinzu kommen noch große Schmutzpartikel und Fasern im Millimeterbereich, bei denen jedoch die Gravitation in der Regel dafür sorgt, dass sie sich vor allem am Boden sammeln (siehe nächste Frage: „Wie kommen die Partikel an die Oberfläche?“).

2.) Wie kommt das Partikel an die Oberfläche?

Je nach Art der Partikel sind es unterschiedliche physikalische Effekte, die Partikel in Richtung Oberfläche „drängen“. Sie sind in [Camuffo, 1998] ausführlich und klar dargestellt, in [Camuffo, 2007] zusammengefasst und werden im Folgenden kurz dargelegt:

Die kleinsten Teilchen ($\ll 0.1 \mu\text{m}$) treffen die Oberfläche statistisch öfter, je höher die Temperatur ist, da sich dann die „**Brown'sche Bewegung**“ erhöht.

Etwas größere Teilchen ($\leq 1 \mu\text{m}$), die aber immer noch nicht wirklich von der Schwerkraft dominiert sind, werden von den sie umgebenden Luftmolekülen zu kälteren Bereichen hin „bugsiert“ (da auf der wärmeren Seite die energiereicheren, schnelleren Moleküle aufprallen, und das Teilchen so einen Nettoimpuls in Richtung kalte Seite erfährt), man spricht hier von **Thermophorese**.

Mittlere und große Teilchen ($\geq 1 \mu\text{m}$) werden einerseits - in ruhiger Luft - von der **Schwerkraft** nach unten bewegt, bis sie auf ein Hindernis stoßen und dort liegen bleiben, andererseits neigen sie - in turbulenter Strömung - dazu, aufgrund ihrer **Trägheit** aus der Strömung auszuscheren und auf die umströmte Oberfläche zu prallen.

Ein weiteres Phänomen, **Stefan-Strom** (Stefan flow) genannt, verursacht eine kontinuierliche Luftströmung zu Flächen hin, an denen Wasserdampf kondensiert oder absorbiert wird¹.

Schlussendlich kann, insbesondere in sehr trockener Luft, **elektrostatische Anziehung** eine Rolle spielen. Staub, und insbesondere Rauch aus Verbrennung (seien es Zigaretten oder

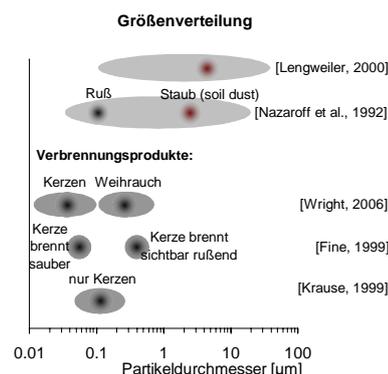


Abbildung 2.20: Typische Partikelgrößen nach unterschiedlichen Autoren

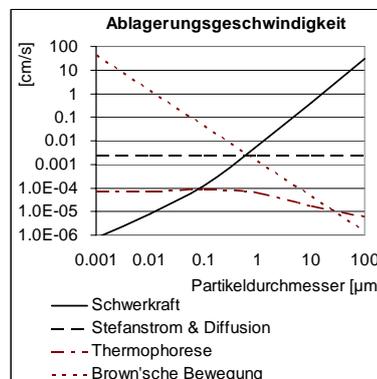


Abbildung 2.21: Ablagerungsgeschwindigkeiten der einzelnen Mechanismen für unterschiedliche Partikeldurchmesser nach [Camuffo, 1998]. Die Thermophorese bezieht sich auf einen Temperaturgradienten von 1K/cm, die Resultierende aus Stefanstrom und (gegenläufiger) Diffusion auf die einer latenten Wärme von 45W/m² entsprechende Kondensationsrate

¹Durch die Kondensation des Wasserdampfes hat die Wasserdampf-Konzentration in unmittelbarer Nähe der Oberfläche ein Minimum - entsprechend diffundieren Wasserdampfmoleküle aus der Luft zur Oberfläche hin, Luftmoleküle von der Wand weg. Da die Oberfläche nun zwar eine „Wasserdampf-Senke“, aber keine „Luft-Quelle“ ist, muss, um den hydrodynamischen Gesetzen Genüge zu tun, Luft nachströmen, damit der Gesamtdruck konstant bleibt

Kerzen), ist in der Regel stark geladen, die Oberfläche kann unter Umständen auch erst beim Aufprall (image charge, contact charging) geladen werden.

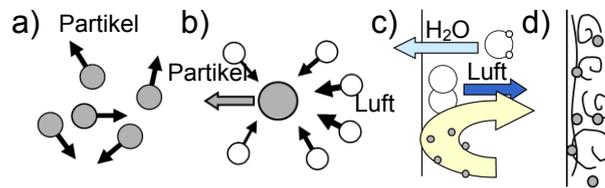


Abbildung 2.22: Unterschiedliche Mechanismen, die Partikel an die Oberfläche bringen: a) Brown'sche Bewegung, b) Thermophorese, c) Stefan Flow, d) Trägheit

Brown'sche Bewegung	$v_{br} \propto \mathcal{D}, \text{grad}C$ mit $\mathcal{D} = \frac{k_B T C_C}{3\pi\mu D}$ also $v_{br} \propto T, \frac{1}{D}, \text{grad}C, C_C$		
Thermophorese	$v_{th} \propto \text{grad}T, \frac{1}{\eta}$		
Gravitation	$v_g \propto \rho D^2, g, C_C$		
Stefanstrom & Diffusion	$v_{st\&diff} \propto C$		
Elektrostatik	$v_e \propto q, E, \frac{1}{D}, C_C$		
D	Durchmesser [m]	C_C	Cunningham slip factor
C	Konzentration	η	Viskosität [g/ms]
T	Temperatur [K]		
q	elektrische Ladung [C]	Konstanten:	
E	elektrisches Feld [V/m]	k_B	Boltzmann-Konstante
\mathcal{C}	Diffusivität	g	Erdbeschleunigung
\mathcal{D}	Kondensationsrate		

Tabelle 2.4: Abhängigkeit der einzelnen Ablagerungsmechanismen von raumklimatischen und partikelspezifischen Größen nach [Camuffo, 1998] und [Lengweiler, 2000]

3.) Was geschieht, wenn ein Partikel die Oberfläche trifft? Prallt es ab oder bleibt es haften?

Die Antwort auf diese Frage hängt, unter anderem, von der Oberfläche und den Partikeln selbst ab [Camuffo, 1998; Israelachivi, 1992; Lengweiler, 2000]:

- Kleine Partikel haften auf rauen Wänden gut, wo sie, geschützt vor der vorbei strömenden Luft, nicht leicht wieder abgelöst werden (Abbildung 2.23a-i).
- Große Partikel hingegen haften besser auf glatten Oberflächen, insbesondere wenn sie beim Aufprall etwas gestaucht werden oder die Unterlage eindrücken (z.B. bei Wachs), sodass die Kontaktfläche größer und die Van-der-Waals-Kräfte stärker werden (Abbildung 2.23b-i).
- Bei einem (auch nur minimalen) Wasserfilm an der Oberfläche werden die Partikel in beiden Fällen infolge der Adhäsion und Oberflächenspannung des Wassers teilweise eingehüllt und besonders effizient festgehalten (Abbildung 2.23a-ii und b-ii). Die Kapillarkräfte sorgen dafür, dass der Wasserfilm auch bei absinkender relativer

Feuchtigkeit der umgebenden Luft erhalten bleibt (u.a. auch [Ranade, 1987]).

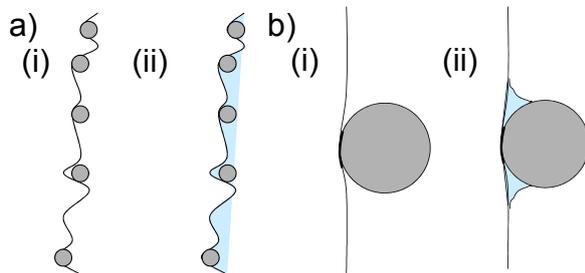


Abbildung 2.23: Haftung kleiner Partikel (a) und großer (b) Partikel an trockener (i) und nasser (ii) Oberfläche

Zusammenfassend bedeutet das, dass für ein schadenshemmendes Raumklima

- Oberflächen nicht kälter als die (vorbei strömende) Luft sein sollten,
- Kondensation auf jeden Fall verhindert werden muss, da sie erstens Partikel anzieht, und diese zweitens an der feuchten Oberfläche definitiv haften,
- Turbulenzen und hohe Luftgeschwindigkeiten vermieden werden sollen.

Eindrücklich sichtbar wird der Effekt niedriger Oberflächentemperatur in der von Lengweiler [2000] untersuchten St.-Gerlachus-Kirche in Houthem (Niederlande): Am 1971 entdeckten und restaurierten Deckenfresko aus dem 18. Jh. bildet sich durch die vermehrte Schwärzung der kälteren Flächen die Holzbalkenkonstruktion der Decke ab (siehe Abbildung 2.24). Auch Arendt [1993] berichtet von ähnlichen Fällen. Er beschreibt Schwärzung als typisches Schadensbild der instationär betriebenen Bankheizung, hat sie aber auch bei Fußbodenheizungen mit ungünstigen Strömungsverhältnissen und schlecht gemachten, den Raum ungleichmäßig erwärmenden Luftheizungen beobachtet. Der Effekt, der in diesen Fällen zur Schwärzung führt, ist ein kombinierter aus verstärkter Ablagerung durch Thermophorese und turbulente Strömung in Wandnähe sowie vermehrte Haftung durch Kondensation oder hohe relative Luftfeuchtigkeit nahe der kalten Oberfläche. Welcher Effekt dominiert - und welche Verbesserungsmaßnahmen also zu treffen sind - muss im Einzelfall untersucht werden.

Zu einem Schadensbild wie in St. Gerlachus kommt es in der Regel nur, wenn gleichzeitig außerordentlich viel Staub und Ruß vorhanden sind. Im obigen Fall wurden rußende Kerzen

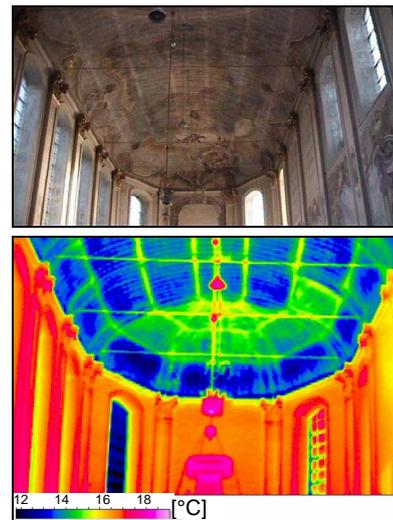


Abbildung 2.24: Im Bereich der Holzbalken ist der Wärmedurchgang durch das Gewölbe geringer und deshalb (i) die Oberflächentemperatur höher und (ii) die Schwärzung geringer (St. Gerlachus in Houthem aus [Lengweiler, 2000], Fußboden- und Bankheizung)

als Partikelquelle ausgemacht [Lengweiler, 2000], ebenso wie in der St. Martinus Kirche in Weert, im Rahmen von deren Untersuchung Lengweiler [2000] die oben zitierte Analyse des Rußverhaltens unterschiedlicher Kerzen durchgeführt hat. Als Schmutzquelle ebenso in Betracht kommen Einträge von der Außenluft, die insbesondere in großen Städten beträchtliche Mengen an Ruß und anderen Schadpartikeln enthalten kann, oder von den Kirchenbesuchern - vor allem bei Schlechtwetter - eingebrachter Schmutz, der auf einem warmen Boden zudem trocknet und leicht flüchtig wird [Künzel, 1998].

Typisch sind auch die Schmutzfahnen im Nahbereich der Zuluftgitter, Konvektoren und Einzelheizgeräte: Der erhöhte Luftstrom und die Turbulenzen führen zur verstärkten Ablagerung der Partikel. Manchmal sind die Strömungsformen an der Wand regelrecht ablesbar!

2.3.4 Biogener Befall

Das Raumklima in Kirchen und dessen Veränderungen können auch das Wachstum einer Mikroflora - und damit einhergehende Schäden an Materialien und Objekten - begünstigen. Am häufigsten anzutreffen sind Pilze, Bakterien und Algen [Camuffo, 2007]. Aber auch Insekten sind leider nicht selten ungebetene Gäste in Holzobjekten [Kleinmanns, 1996; Sutter, 1997].

Drei wesentliche Wachstumsvoraussetzungen - Temperatur, Feuchtigkeit und Substrat - müssen über einen bestimmten Zeitraum simultan erfüllt sein, damit sich die oben genannten Schädlinge ansiedeln können [Sedlbauer u. a., 2002]. Dabei können die Faktoren nicht unabhängig voneinander betrachtet werden: Brauchen z.B. Schimmelpilze auf Kalkzementputz mit Anstrich bei 10°C mindestens 95% Luftfeuchte, um auszukeimen und zu wachsen, reichen bei 25°C schon 80% aus, auf Gipsputz mit Anstrich sind es auch bei 10°C nur 86% [Hofbauer u. a., 2005]. Außerdem ist den meisten Arten gemein, dass sie für das weitere Wachstum auch mit weniger optimalen Bedingungen als bei Auskeimen vorlieb nehmen, und zudem auch längere Zeiträume unter ungeeigneten Bedingungen überstehen können.

Der Zusammenhang der Voraussetzungen (i) für die Auskeimung und (ii) für das Wachstum wird in sogenannten Isolethensystemen dargestellt: Kurven mit (i) konstanter Auskeimungszeit und (ii) Wachstumsrate in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit. Von Sedlbauer [2001] wurden die

Isoplethen unterschiedlicher baurelevanter Schimmelpilzarten in ein gemeinsames Isoplethensystem umgesetzt (siehe Abbildung 2.25). Dabei unterscheidet er folgende Substratgruppenen:

- 0: optimaler Nährboden
- 1: biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, stark verschmutzte Flächen...
- 2: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe

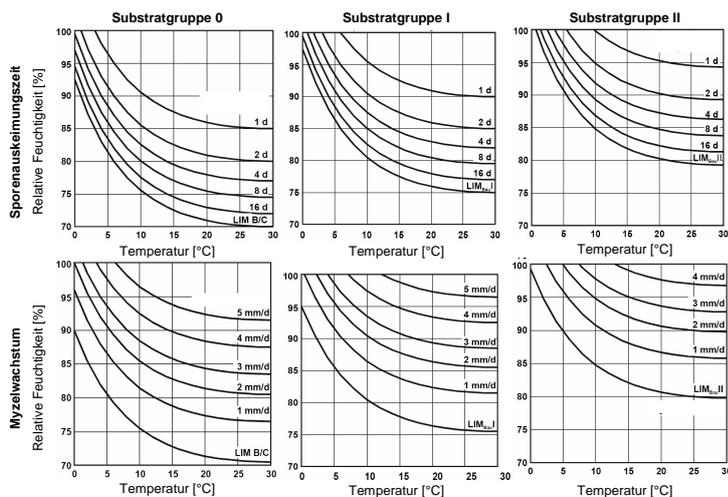


Abbildung 2.25: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung nach [Sedlbauer, 2001], das für alle im Bau auftretende Pilze gilt. Die angegebenen Werte charakterisieren (oben) die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist, und (unten) das zu erwartende Wachstum in mm pro Tag; LIM=Lowest Isopleth for Mould

Materialspezifische Wachstumsisoplethen, wie sie Hofbauer u. a. [2005] darstellt, zeigen noch einmal deutlicher die Substratabhängigkeit. Dabei sind laut Autoren in Abbildung 2.26 die oberen Kurven maßgeblich für die Beurteilung einer nicht mit zusätzlichen Nährstoffen beaufschlagten Fläche.

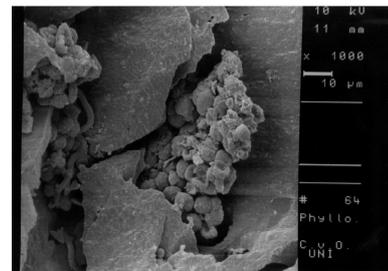


Abbildung 2.27: SEM-Bild einer Pilzkolonie auf Marmor (aus [Dornieden u. a., 2000], Fillopappou Hill, Athen): Steinschollen werden langsam abgehoben

Der Einfluss von Trockenphasen kann beurteilt werden, wenn dieses Isoplethenmodell mit einem bio-hygrothermischen Sporenmodell kombiniert wird, welches den Feuchteaustausch zwischen Spore und Umgebung simuliert. Zusammen mit einer Zeitreihe zu Temperatur und Feuchtigkeit (sei die Reihe simuliert oder gemessen) kann dann das Risiko des Schimmelbefalls berechnet werden [Sedlbauer u. a., 2002].

Luftbewegung mindert in der Regel das Schadensrisiko, allerdings nur indirekt - insofern, als sie die Trocknung der Materialien unterstützt [Camuffo, 2007].

Diakumaku u. a. [1995] beschreibt die Kolonialisierung von

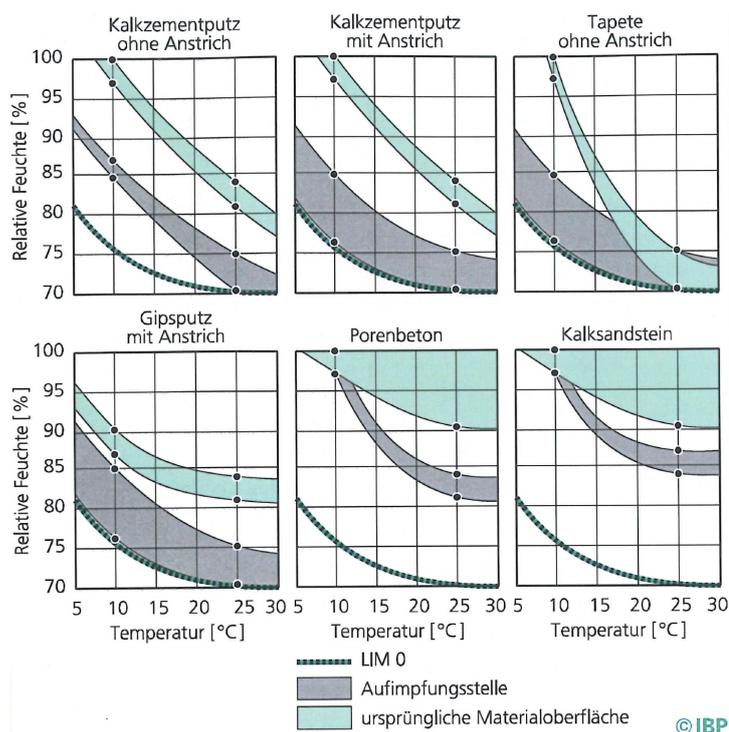


Abbildung 2.26: Darstellung der Isolplethenbereiche für unterschiedliche Materialien, nach [Hofbauer u. a., 2005].



Abbildung 2.28: Wandmalerei (Detail aus der „Anbetung durch die Könige“, St. Martin, Greene, Westwand) von 1575 mit deutlichen Verfärbungen; die Punkte entsprechen einzelnen Pilzkolonien (aus [Dornieden u. a., 2000])

Marmor und Kalkstein durch „black fungi“ (insbesondere *Phoma* und *Alternaria*) - denen sie im Übrigen die meisten Fälle von Schwärzung und brauner Patina auf obigen Materialien zuschreiben. Die Pilze siedeln sich auf der Steinoberfläche an und haften dort fest, sie haben sogar die Fähigkeit, in den Stein einzudringen. Die von ihnen produzierten Melaninpigmente können die Steine deutlich färben, insbesondere wenn sich die Kolonie dank gutem Feuchtigkeits- und Nahrungsangebot rasch auf der Oberfläche ausbreitet. Bei hoher Feuchtigkeit und geringem Nahrungsangebot hingegen werden sich bevorzugt Flechten und Algen ausbreiten [Diakumaku u. a., 1995].

Dass der „Biofilm“ mineralischen Untergrund mechanisch angreift, zu Rissen im Mörtel und Ablätterungen der Steinoberflächen führen kann, zeigen explizit Dornieden u. a. [2000] (siehe Abbildung 2.27). Die vorgefundenen Mikroorganismen umfassen - typisch für Innenräume - Actinomycetes, Bakterien, Cyanobakterien und „ascomycetous microscopic fungi“. Allerdings kam in beiden beschriebenen Schadensfällen zum Feuchteangebot ein spezielles Nahrungsangebot hinzu: Insektenexkremente im ersten Fall und Weinkeller-Dämpfe im zweiten.

Aber auch wenn Steinoberflächen in Kirchen oft dominieren, auch Holz kann von Mikroorganismen angegriffen werden - Nährstoffe finden sie dort in der Regel sogar leichter. Kleinmanns [1996] beschreibt eine Reihe von in historischen Bauwerken vorkommenden biologischen Schädlingen:

- Saprophytische Pilze (i.e. Pilze, die von totem organischen Material leben), wie z.B. der Echte Hausschwamm (ab 20% Holzfeuchte, 18-22°C) und der Kellerschwamm (ab 25% Holzfeuchte), bauen mit Hilfe der Pilzhypphen die Holzsubstanz ab.
- Schimmelpilze selbst wirken nicht holzerstörend, können aber mit Bläuepilzen auftreten, die gefasste Holzoberflächen zerstören.

Im Bereich der Holzspiegel unter Bänken zum Beispiel können sich Temperaturen und Feuchtigkeiten einstellen, die ein Wachsen von Pilzen ermöglichen [Arendt, 1976b; Troi, 2002e], insbesondere bei regelmäßiger Erwärmung z.B. durch eine Bankheizung und Feuchtigkeitszufuhr aus dem Boden.

Erschwerend hinzu kommt, dass viele der Schwämme jahrelange „Durststrecken“ meistern: Der Echte Hausschwamm kann bei 7.5°C 7 Jahre, bei 20°C immerhin 2 Jahre Trockenstarre überstehen.

Trockenholzinsekten unterscheiden sich hinsichtlich der bevorzugten Holzarten, der Verwertung einzelner Nährstoffe im Holz durch die Insektenlarven sowie der klimatischen Bedingungen für ein optimales Larvenwachstum [Kleinmanns, 1996]:

- Hausbocklarve: optimales Wachstum bei 28-30°C, 10-12% Holzfeuchtigkeit
- Nagekäferlarve: kein Wachstum über 22°C
- Splintholzkäferlarve: normales Wachstum bei mind. 8% Holzfeuchtigkeit
- Gewöhnliche Nagekäferlarve: optimales Wachstum bei 10-12% Holzfeuchtigkeit (entsprechend 60% rel. Luftfeuchtigkeit bei 20°C)

Eine dauerhafte Unterschreitung von ca. 10% Holzfeuchte ist zwar kaum möglich und auch kaum erwünscht, eine Steuerung der relativen Luftfeuchtigkeit zur Vermeidung von holzerstörenden Insekten ist jedoch auch deshalb sinnvoll, da diese meist nach einem Befall des Holzes mit Pilzen auftreten (z.B. Anobium punctatum (Falsche Totenuhr, Gewöhnlicher Nagekäfer), Nestobium rufovillosum (Totenuhr, Bunter Nagekäfer) und Coelestethus pertinax (Trotzkopf))[Kleinmanns, 1996].

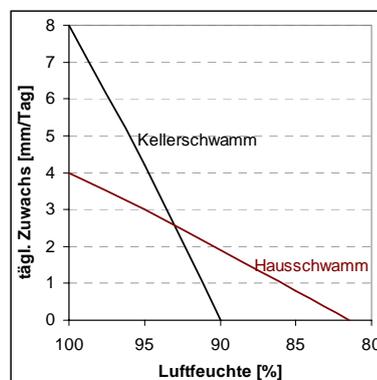


Abbildung 2.29: Abhängigkeit des Wachstums von Hausschwamm und Kellerschwamm von der relativen Feuchtigkeit nach [Schneider, 1994]

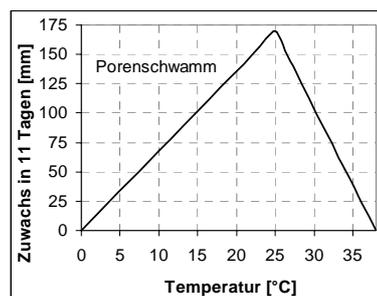


Abbildung 2.30: Wie bei den meisten Schwämmen ist das Wachstum des Porenschwamms temperaturabhängig: Zwischen 5°C und 15°C verdreifacht es sich! [Schneider, 1994]

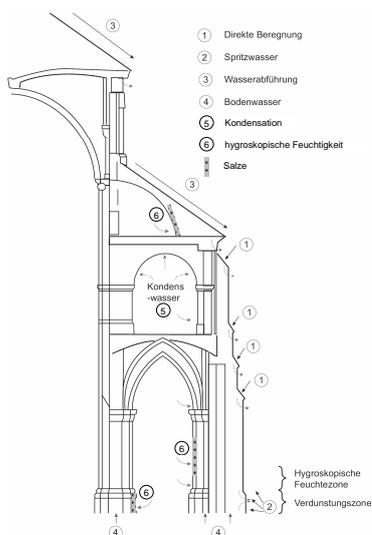


Abbildung 2.31: Schematische Darstellung der möglichen Ursachen und Quellen von Feuchtigkeit an einer Kirchenfassade, nach [Franzen, 2002], ergänzt

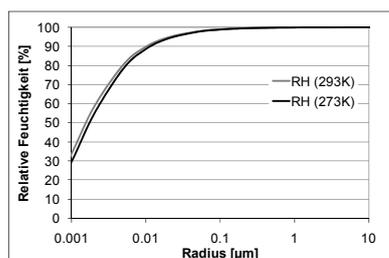


Abbildung 2.32: Kapillarkondensation: je kleiner der Porenradius, desto geringer die relative Luftfeuchte (Dampfdruck/Sättigungsdampfdruck), mit der eine Wasseroberfläche im Gleichgewicht ist (i), und desto höher die Temperatur bei der es zu Kondensation kommt (ii), nach [Camuffo, 1998] entsprechend Kelvin-Gleichung

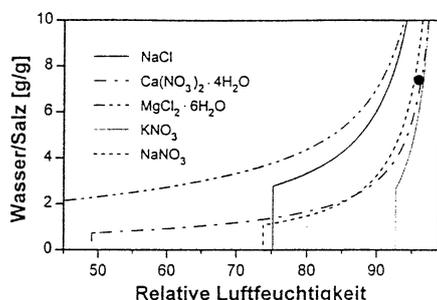


Abbildung 2.33: Wasseraufnahme reiner Salze in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit, aus [Steiger u. Dannecker, 1995]

2.3.5 Schäden durch Salze

Salze an und für sich sind für die Wand keine Gefahr, aber im Zusammenspiel mit Wasser entfalten sie eine gefährlich zerstörerische Wirkung.

Deshalb stehen zwei Fragen im Zentrum, wenn es darum geht, einen Schadensfall zu verstehen oder ein Schadensrisiko zu bestimmen:

1.) Welche Feuchtigkeitsquellen sind vorhanden?

- **Bodenfeuchtigkeit** steigt über die Kapillaren bis auf (maximal) 1-2m Höhe. Die Steighöhe hängt von der Porosität des Mauermaterials ab - je kleiner die Poren desto höher [Arendt, 1983b; Camuffo, 1998]. Mancher Sandstein, fast alle Ziegel und alle historischen Mörtel zeigen ausgeprägte Kapillarität; dichte Natursteine, aber auch sehr grobporiger Quelltuff eine geringe [Arendt, 1996].
- **Regen und Spritzwasser** kann von der äußeren Oberfläche nach innen weitergeleitet werden, insbesondere wenn das anfallende Wasser - sei es durch Baumängel, Putzschäden oder bei besonders offenporigen Fassaden - nicht abtrocknet, sondern weiter eindringt [Arendt, 1983b, 1996].
- **Kondensation** von Feuchtigkeit aus der Luft an kalten Oberflächen, wenn deren Temperatur den sogenannten Taupunkt der feuchten Luft unterschreitet, oder - anders ausgedrückt - die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft beim Abkühlen auf Wandtemperatur über 100% steigt. In Poren kondensiert die Feuchtigkeit der Luft schon bei einem Dampfdruck unter dem Sättigungsdampfdruck, und damit bei höheren Temperaturen (siehe Abbildung 2.32). Aktiv wird dieser Mechanismus bei feinporigen Materialien mit einem Porenradius unterhalb von $0.1 \mu\text{m}$ [Camuffo, 1998; Franzen, 2002].

Hygroscopische Feuchtigkeit rührt daher, dass ein Salzkristall ab einer bestimmten Luftfeuchte spontan Wasser aus der Luft aufnimmt und in eine gesättigte Lösung übergeht. Diese Luftfeuchte ist für jedes Salz charakteristisch und wird Deliqueszenzfeuchte genannt [Franzen, 2002]. Oft wird ein Salz mit niedriger Deliqueszenzfeuchte wie z.B. Calciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), das schon bei einer relativen Luftfeuchte unter 50% in Lösung geht, als hygroscopisch bezeichnet; das bedeutet jedoch nicht unbedingt, dass es auch mengenmäßig besonders viel Wasser aufnimmt - wie der Vergleich mit dem erst bei 75% in Lösung gehenden, aber deutlich mehr Wasser aufnehmenden NaCl in Abbildung 2.33 zeigt.

2.) Wo kommen die Salze her?

- Salze aus dem Boden können mit aufsteigender Feuchtigkeit in die Wand transportiert werden (Abbildung 2.34, Arnold u. a. [1989]). Nicht selten kommen zu den bodenbedingt natürlich vorhandenen Ionen noch weitere - nutzungsbedingte - dazu: Diese reichen vom Streusalz im Stadtbereich bis zu Nitraten bei landwirtschaftlich genutzten Gebieten [Arendt u. Seele, 2000] - und können auch dem mit Kochsalz „haltbar“ gemachten Weihwasser entstammen, das, wie Arendt u. Seele [2000] an einem Fallbeispiel beschreibt, regelmäßig in einen Schacht - in der Kirche, da geweihtes Wasser - entsorgt wurde.
- Salze können aber auch schon von Anbeginn im Mauerwerk vorhanden sein und durch Feuchtigkeit oder später dazukommende Salze aktiviert werden [Arnold, 1981; Arendt u. Seele, 2000]; insbesondere der Kondensation kommt hier Bedeutung zu, durch die, wie Arnold u. a. [1996] explizit betont, alle, auch wenig hygroskopische, Salze (an)gelöst werden.
- Außerdem werden durch alkalihaltige Mörtel und Putze (z.B. Portlandzement), Sanierputze und Wasserglas neue Salze ins System eingebracht [Arnold, 1981; Arnold u. a., 1996; Arendt u. Seele, 2000].

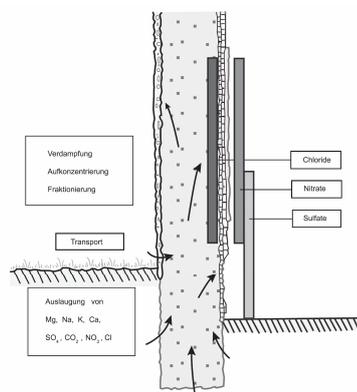


Abbildung 2.34: Beim Transport von Salzionen durch das Mauerwerk kristallisieren mit zunehmend verdampfendem Wasser zuerst die schwer löslichen, dann die leichter löslichen Salze aus, sodass bei aufsteigender Feuchte an der Wand in unterschiedlichen Höhen unterschiedliche Salze kristallisieren [Arnold u. a., 1989]

Salze können im Gesteinsgefüge erheblichen Schaden anrichten - und auch wenn über die einzelnen wirkenden Kräfte und Schadensmodelle noch diskutiert wird (z.B. [Duttlinger u. Knöfel, 1993; Sneathlage u. Wendler, 1997; Charola u. Weber, 1992; Lubelli, 2006]), kann davon ausgegangen werden, dass die Schäden wesentlich durch Volumenänderungen und entstehende Drücke beim, unter Umständen wiederholten, Kristallisieren und Hydratisieren verursacht werden:

A) Kristallisation & Kristallwachstum

Zur Kristallisation eines gelösten Salzes kann es aus verschiedenen Gründen kommen:

A1) Das Wasser, in dem das Salz gelöst ist, verdampft.

Wie in Abbildung 2.34 beschrieben, kristallisieren Salze aus der Grundfeuchteauslösung aus, sobald so viel Wasser verdampft ist, dass die Lösung bezüglich dieses Salzes übersättigt ist: Je schwerer löslich ein Salz ist, desto näher an der Quelle wird es ausfallen (Löslichkeiten typischer Bausalze in Tabelle 2.5).

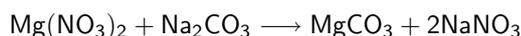
Arnold u. a. [1996] nennt den Einfluss der Heizung auf diese Salzkristallisation gering - sie kristallisieren in der Regel einmal, sofern der Mauerfuß nicht periodisch durchfeuchtet wird.

chemische Bezeichnung	Name	Formel	Dq (%)	Löslichkeit (mol/kg)	Häufigkeit	
<i>Chloride</i>						
Calciumchlorid	Antarclit	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27.5	7.58		
Magnesiumchlorid	Bischofit	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33.4	5.81		
Natriumchlorid	Halit (Steinsalz, Kochsalz)	NaCl	75.2	6.16	x	
Kaliumchlorid	Sylvin	KCl	84.3	4.81		
	Tachyhydrit	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$				
	Carnalit	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			x	
<i>Karbonate</i>						
Calciumkarbonat	Kalzit	CaCO_3			xxx	
	Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$				
Magnesiumkarbonat	Magnesit	MgCO_3				
	Nesquehonit	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$				
	Thermonatrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$			xx	
	Natrit (Soda)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	92.0			
	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			xx	
<i>Sulfate</i>						
Calciumsulfat	Anhydrit	CaSO_4			x	
Calciumsulfat	Bassanit	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$				
Calciumsulfat	Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			xxx	
Magnesiumsulfat	Hexahydrit	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			xx	
Magnesiumsulfat	Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	90.4	3.02	xx	
Natriumsulfat	Thenardit	Na_2SO_4	82.0		xxx	
Natriumsulfat	Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	93.6	1.95	xxx	
	Glauberit	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$			xx	
	Eugsterit*	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			x	
	Picromerit (Schoenit)	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$			x	
	Ammoniumsulfat*		$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	80	5.81	xx
		Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$			xx
	Hanksit*	$\text{KNa}_2(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_3\text{Cl}$			x	
<i>Nitrate</i>						
Kaliumnitrat	Nitrokalit (Kalisalpeter)	KNO_3	92.6	3.8	xxx	
Natriumnitrat	Nitronatrit (Natronsalpeter)	NaNO_3	73.8	10.83	xx	
Magnesiumnitrat	Nitromagnesit	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	53.7	4.9		
	Nitrocalcit	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	49.1	8.4		
Ammoniumnitrat	Ammonsalpeter	NH_4NO_3	61.5	26.28	x	

Tabelle 2.5: Namen und Zusammensetzung von Salzen, die in der Bauwerksverwitterung eine Rolle spielen, * Doppelsalze, nach [Franzen, 2002; Arnold, 1981; Steiger u. Dannecker, 1995]; Häufigkeit nach [Grassegger, 1997]: x=selten, xx=häufig, xxx=sehr häufig nachgewiesen.

Die Heizung kann insofern eine Rolle spielen, als die Verdampfungsrate in der Mauer von deren Temperatur abhängt, und damit der Verdampfungshorizont - und die Kristallisationszone - verschoben werden kann. Außerdem kann durch wärmere Luft im Raum und die damit geringere relative Luftfeuchtigkeit und höhere Verdampfungsrate, der Verdampfungshorizont unter Umständen von der Oberfläche nach innen verschoben werden.

A2) Durch eine chemische Reaktion entsteht ein neues Salz, das in der vorhandenen Lösungsmittelmenge nicht lösbar ist. Arnold u. a. [1996] berichten zum Beispiel, dass in der Klosterkirche Müstair aus dem in der Mauer gelösten Magnesiumnitrat durch die Reaktion mit Natriumcarbonat (aus Portlandzement oder Wasserglas) ein schwer lösliches Magnesiumcarbonat entsteht, welches dort als Kruste kristallisiert - und in der Nordapsis die romanische Malerei abstößt.



Das Raumklima - und damit die Heizung - hat darauf praktisch keinen Einfluss.

A3) Die relative Feuchte sinkt unter die Deliqueszenzfeuchte

Dieser schon auf S. 35 kurz beschriebene Vorgang wird ganz wesentlich vom Raumklima beeinflusst - und entsprechend groß ist der Einfluss der Heizung: Schwankt die relative Feuchtigkeit nämlich um die Deliqueszenzfeuchte von in der Wand vorhandenen Salzen, kommt es zu ständigen Lösungs- und Rekristallisationsvorgängen - und damit verbunden Quell- und Schwindbewegungen, die nicht reversibel sind ([Snethlage u. Wendler, 1997; Lubelli, 2006]). In der Literatur sind eine ganze Reihe von Salzschäden dokumentiert, die mit Schwankungen der relativen Feuchtigkeit korrelieren; beispielhaft seien hier genannt das Ausblühen von NaNO_3 in der Klosterkirche von Müstair [Arnold u. a., 1996], von NaNO_3 und NaCl in der Krypta des Zürcher Großmünsters [Zehnder u. a., 1986], NaCl in St. Laurentii auf Föhr [Tennikat u. a., 1995], NaCl in St. Nicholas in Brouwershaven/Niederland [Lubelli u. a., 2005].

Die in Tabelle 2.5 aufgeführten Deliqueszenzfeuchten gelten für einfache Salze bei 25°C . Sobald mehrere Salze gemeinsam vorkommen - und das ist praktisch immer der Fall - beeinflussen sie sich gegenseitig - und die Deliqueszenzfeuchte kann leider nicht zwischen jenen der beiden Einzelsalze interpoliert werden: Steiger [1994] zeigt am Beispiel einer NaCl - NaNO_3 -Mischung, dass sie vom Konzentrationsverhältnis der beteiligten Salze abhängt und auch unter der Deliqueszenzfeuchte der beiden Einzelsalze liegen kann. So genannte Wasseraktivitäts-Diagramme stellen die Deliqueszenzfeuchten für unterschiedliche Salzsysteme dar (Abbildung 2.36 für NaCl - NaNO_3 , weitere aus [Steiger, 1994; Steiger u. Dannecker, 1995] im Anhang).

B) Hydratation

Unter hydratbildenden Salzen versteht man solche, die in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Temperatur und relativer Feuchtigkeit) Wassermoleküle in ihr Kristallgitter einbauen - und damit ihr Volumen verändern.

NaSO_4 z.B. kommt bei 10°C in drei unterschiedlichen Formen vor: Bis etwa 70% als Thenardit (NaSO_4), steigt die Feuchtigkeit weiter an, wird Wasser eingebaut und Mirabilit entsteht ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), welches wiederum bei einer relativen Feuchtigkeit von über 95% in Lösung geht (siehe Abbildung 2.37).

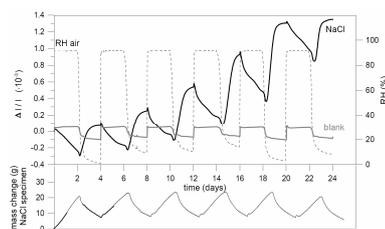


Abbildung 2.35: Lubelli [2006] zeigt, dass im Gegensatz zur nichtversalzten Probe (blank), die bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit quillt und bei geringer schwindet, eine mit NaCl belastete Mörtelprobe bei hoher Feuchtigkeit schwindet und sich bei geringer Feuchtigkeit ausdehnt - bei wiederholten Zyklen auf nicht reversible Weise.

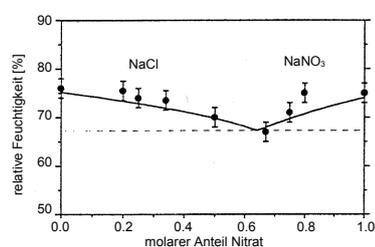


Abbildung 2.36: Bei einer NaCl - NaNO_3 -Mischung mit 30% Nitratanteil beginnt bei einer relativen Feuchtigkeit von 72,3% NaCl zu kristallisieren (was etwas unter der Deliqueszenzfeuchte von reinem NaCl liegt), bei weiter sinkender relativer Feuchtigkeit kristallisiert weiterhin nur NaCl , bis bei 67,3% der so genannte „invariante“ Punkt erreicht ist. Sinkt die Feuchte unter diesen Wert, kristallisieren beide Salze. Umgekehrt wird bei 80% Nitratanteil zuerst NaNO_3 ausfallen, und zwar ab einer relativen Feuchtigkeit von 70,7%, und wiederum erst bei Unterschreiten von 67,3% beide Salze. Bei einem Mischungsverhältnis, das dem invarianten Punkt entspricht, verhält sich das Gemisch wie „ein“ Salz mit Deliqueszenzfeuchte 67,3%: Bis dahin kristallisiert kein Salz aus, darunter beide [Steiger u. Zeunert, 1996].

Salz	Formel	Molgewicht [g]	Molvolumen [cm ³]	Dichte [g/cm ³]	Löslichkeit [g/l] bei 20 °C
Thenardit	NaSO ₄	142	53	2.68	533
Mirabilit	NaSO ₄ ·10H ₂ O	322	220	1.46	191
Kieserit	MgSO ₄ ·H ₂ O	138	57	2.57	340
Epsomit?	MgSO ₄ ·7H ₂ O	246	130	1.68	35.6

Tabelle 2.6: Vergleich der physikochemischen Eigenschaften unterschiedlicher Hydratformen verschiedener Salze, nach [Franzen, 2002] und [Stürmer, 1997]

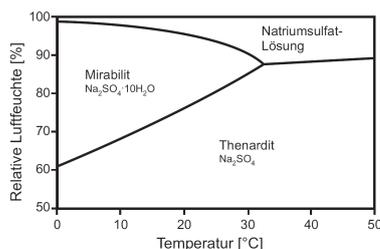


Abbildung 2.37: Stabilitätsdiagramm für das Na-SO₄-H₂O System von 0-50 °C [Steiger u. Dannecker, 1998]

Mit der Hydratisierung einher geht eine Volumenzunahme von 53 cm³/mol auf 220 cm³/mol. Das entspricht einer Vervielfachung!

Die stärksten Schäden werden jedoch durch schnelle Kristallisation von Mirabilit aus gesättigter Lösung erzielt, bei welcher sehr große Kristalle entstehen [Steiger u. Dannecker, 1998], während bei der „trockenen“ Umwandlung von Thenardit zu Mirabilit eine außen entstehende Mirabilitschicht den Prozess bremst [Charola u. Weber, 1992; Steiger u. Dannecker, 1998]. Läuft die Umwandlung unter Zutritt von flüssigem Wasser ab, kommt es auch hier zu der erwarteten Volumenzunahme.

Den hydratbildenden Salzen wird insgesamt eine erheblich größere zerstörerische Wirkung nachgesagt als solchen, die keine Hydratphase bilden [Schmölzer, 1936] - nicht umsonst wird der Salzsprengtest nach DIN 52111 mit Natriumsulfat durchgeführt.

Je nach Art der Salze, den Umgebungsbedingungen (insbesondere der Feuchtigkeit) und nach dem Ort, an dem sie kristallisieren, geschieht dies in unterschiedlicher Form (von Krusten bis zu Whiskern) und mit unterschiedlichem Schadensbild. Hier seien beispielhaft zwei Beschreibungen zitiert:

Arnold u. a. [1996] beschreibt folgende Erscheinungsformen und Schadensarten

- **Salzflaum:** sehr lockere, wolle- oder watteartige Salzausbildungen aus nadeligen und haarförmigen Kristallen, vorwiegend auf sehr glatten Oberflächen. Salzflaum ist oft von Farbsplittern durchsetzt.
- **Salzrasen:** lockere Beläge nadeliger bis stängeliger, mehr oder weniger senkrecht auf der Oberfläche stehender Kristalle. Sehr feinkristalline Salzrasen erscheinen makroskopisch als Schleier. Auch Salzrasen können Salz- und Mörtelsplittter enthalten, die beim Wachsen abgesprengt und angehoben wurden. Bei höherer Luftfeuchtigkeit entwickeln sich durch Rekristallisation und Zusammenbacken der Körner allmählich Krusten.

- *Pulverige Salzausblühungen*: weiße, mehlig, dichte oder lockere bis flockige Überzüge, sehr feinkristalline Aggregate. In der Regel an trockener Luft dehydratisierte und zu feinsten Kristallen rekristallisierte Hydratsalze.
- *Salzkrusten*: kompakte, oft fest auf der Unterlage haftende Salzaggregate. Krusten wachsen teils an der Oberfläche oder Malschicht, teils unter der Malschicht, in Rissen und Zwischenräumen des Mörtels, wobei Farb- und Mörtelsplitter oder ganze Putzschichten abgestoßen werden. Sehr dünne Krusten können die Oberfläche transparenter und dunkler machen, und so feuchte Flecken vortäuschen. Oft werden Krusten auch als graue oder weißliche Schleier wahrgenommen.
- *Salzpesteln*: kleine „Inseln“ von Salzkrusten. Sie entstehen häufig an kleinen Fehlstellen, wo Salze punktuell und konzentriert kristallisieren.
- *Trichterchen*: Vertiefungen, die durch das Abplatzen von Farbsplittern entstehen. Im Zentrum des Trichterchens befindet sich meist ein Schiefer- oder Glimmerplättchen. Das offenbar bevorzugt auf solchen flachen Körnern kristallisierende Salz sprengt den Farb- oder Mörtelsplitter ab.

In Abbildung 2.38 sind nach Arnold [1981] typische Schadensbilder schematisch dargestellt.

Die Vielfalt der vorkommenden Salze beeindruckend, und ebenso groß ist die Vielfalt der eingrenzenden Bedingungen, will man jeden Schadensmechanismus von vornherein ausschließen: Es ist unmöglich, ein Raumklima zu schaffen, in dem keines der Salze aktiv werden könnte. Das bedeutet, dass für jede Kirche aus der Baugeschichte abgeschätzt werden muss, welche Salze vorhanden sein könnten, die Mauern unter Umständen auf deren tatsächliches Vorkommen untersucht, und zuletzt das Raumklima möglichst optimal eingegrenzt werden müssen.

2.3.6 Normen und Empfehlungen

Die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, wie vielfältig die Schadensmechanismen und die Ansprüche verschiedener Materialien und Objekte und das Raumklima sind.

Kilian u. a. [2005] versuchen der Anforderungsvielfalt mit einem „Komfortdiagramm“ für Kunstwerke zu begegnen, das den Bereich eingrenzt, innerhalb dessen das Schadensrisiko durch Klimaeinwirkung als gering anzusehen ist. Ein solches Diagramm muss aber doch für jede Materialkombination neu

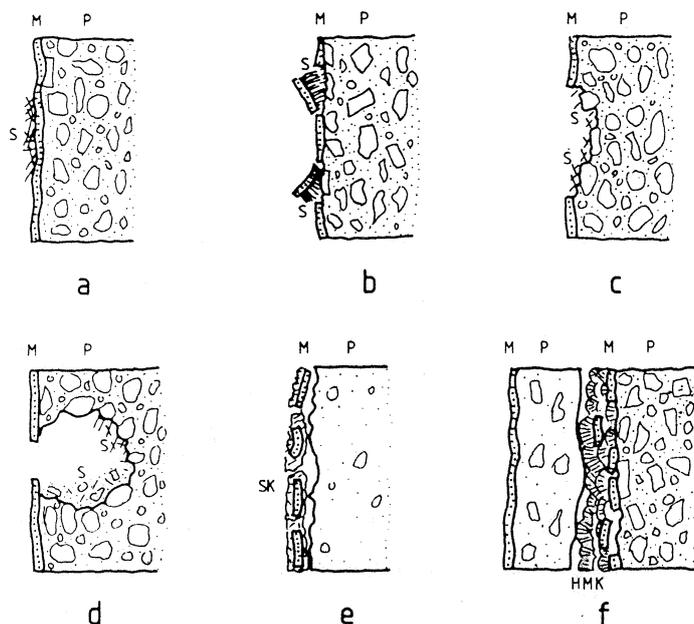


Abbildung 2.38: Typische Formen der Salzverwitterung an Wandmalereien (aus [Arnold, 1981]. M=Malschicht, P=Putzmörtel, S=Salze, SK=Salzkruste, HMK=Hydromagnesitkruste.

a) nadelige Salze kristallisieren an der Oberfläche; b) nadelige Kristalle sprengen Farbsplitter ab; c) und d) fortschreitende Stadien der Zelle- (Alveolar-) Verwitterung; e) Salzkruste hebt eine ganze Farbschicht ab; f) eine jüngere Putzschicht mit Malerei wurde durch Bildung einer Hydromagnesitkruste abgestoßen.

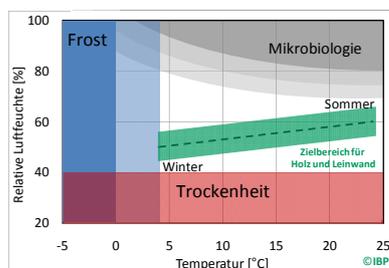


Abbildung 2.39: „Komfortdiagramm“ für Kunstwerke (hier für Holz und Leinwandgemälde) nach [Kilian u. a., 2005]: Der zentrale weiße Bereich gibt das akzeptable Klima an. Begrenzt wird er durch (i) die Frostgefährdung unterhalb von 4°C, (ii) Bereiche unterschiedlich starker mikrobiologischer Aktivität und (iii) Trockenheit unterhalb von 40%

erstellt werden; Abbildung 2.39 zeigt exemplarisch die optimalen Bereiche für Holz und Leinwandgemälde. Grundsätzlich unterstreichen die Autoren, dass weniger die absoluten Werte von relativer Feuchtigkeit und Temperatur für die Risikoeinschätzung ausschlaggebend sind, als vielmehr die Häufigkeit, in der Schwankungen durchlaufen werden.

Dass Schadensprozesse einen kumulativen Charakter haben, und sowohl die Intensität als auch die Häufigkeit der Ereignisse den Schadensgrad bestimmen, unterstreicht auch die italienische Norm zur „Auswahl und Kontrolle des Mikroklimas für die Erhaltung kultureller Güter in Innenräumen“ [UNI 10969, 2002], die explizit auch Kirchen als solche „Innenräume“ zitiert. Sie weist außerdem darauf hin, dass sich ein Objekt im Laufe seiner Geschichte an das umgebende Klima anpasst, und dass es mit zunehmendem Alter empfindlicher auf Veränderungen reagiert. Es kommt also weniger auf die Einstellung optimaler Standardwerte an (wenngleich solche von der UNI 10829 [1999] als Richtwerte sehr wohl bereit gestellt werden), als auf die Bestimmung des für das spezifische Objekt geeigneten Raumklimas an. Die Norm nennt deshalb auch keine absoluten Grenzwerte, sondern formuliert

vielmehr Richtlinien, u.a. folgende, die auch auf die typische Situation in Kirchen zutreffen:

- Kunstwerke sind im selben Raumklima zu belassen, in dem sie sich über lange Zeit befunden und an das sie sich angepasst haben, sofern sich dieses als nicht schädlich erwiesen hat.
- Das Raumklima kann jedenfalls verbessert werden, indem Störungen (wie z.B. Tagesschwankungen, Fluktuationen, rasche Veränderungen, Gradienten) abgemildert oder vermieden werden.
- Sollte eine Veränderung des originalen Raumklimas nicht vermeidbar sein, muss zuvor die Kompatibilität der spezifischen Erhaltungs- und Klimageschichte, seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften und des neuen Raumklimas untersucht und geprüft werden.
- Wenn das Raumklima, in dem ein Kunstwerk erhalten wird, geändert werden muss, so muss (i) dieser Übergang sehr langsam geschehen, sodass sich das Objekt schrittweise an die neue Situation anpassen kann, und (ii) kontinuierlich geprüft werden, ob das Objekt der Veränderung schadensfrei folgt.

Auch die neue europäische Norm, speziell zur Beheizung von Kirchen (in deutscher Fassung „Spezifikationen und Kontrolle des Raumklimas - Beheizung von Kirchen“ [DIN EN 15759 (Entwurf), 2008]) unterstreicht die Wichtigkeit der „Klimageschichte“. Sie hebt außerdem hervor, dass die relative Feuchtigkeit in der Regel der kritische Faktor ist - wobei diese sowohl von der absoluten Feuchtigkeit als auch von der Temperatur abhängt. Zur Bestimmung des „sicheren Bereiches“ für die relative Feuchtigkeit legt sie die messtechnische Erfassung des Raumklimas über ein Jahr nahe (Berechnung von Zielniveau und erlaubten Tagesschwankungen nach [DIN EN 15757 (Entwurf), 2008], siehe Anhang A.3). Erfolgt die Beheizung nicht aus konservatorischen Gründen (Vermeiden biogener Schäden durch zu hohe Feuchtigkeit und Kondensation), sondern um die thermische Behaglichkeit der Kirchenbesucher zu verbessern, soll die Wärme so lokal als möglich den Bereichen, wo sich dieselben aufhalten, zugeführt werden und die Störung des Klimas in der direkten Umgebung der historischen Einrichtungsgegenstände so gering wie möglich sein.

Der Tenor dieser Normen bestätigt einen Trend der sich in den letzten 30 Jahren abgezeichnet hat: weg von definierten Grenzwerten.

In den 1960er und 1970er Jahren, als sich die Beobachtungen von Schäden, die der Kirchenheizung zugeschrieben wurden, häuften, war der Ruf nach Richtlinien und Grenzwerten sehr stark. Der sich damals herausbildende Konsens ist in der Empfehlung einer Grundtemperatur von 8°C, einer Gottesdiensttemperatur 12°C-15°C und einer maximalen Temperaturveränderung beim An- und Abheizvorgang von 1.5K/h in den „Richtlinien für die Beheizung von Kirchen“ (veröffentlicht im Rahmen der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.-27.5.1972 in Mainz [Mainz, 1973]) zusammengefasst und hat das Thema jahrelang geprägt (z.B. tauchen sie auch 1997 im Merkblatt „Kirchenheizung und Orgel“ der EKHN [Albrecht u. a., 2000] noch auf). Was die relative Feuchtigkeit angeht, wurden auf derselben Tagung von Schmidt-Thomsen [1973] 50% bis 65% propagiert, vor allem Orgelbauer geben Empfehlungen in dieser Hinsicht ab.

Typisch für die Diskussion in jenen Jahren ist jedoch, dass auch die Feuchtigkeit betreffende Grenzen in der Regel als Temperaturen definiert werden: Das langsame Aufheizen soll den Feuchteausgleich erlauben, und dass die Temperatur nicht über 12-15°C betragen soll, liegt daran, dass erfahrungsgemäß bei diesen Werten die Feuchtigkeit nicht zu stark sinkt. Dies ist jedoch

(i) gleichbedeutend damit ist, ein Standard-Außenklima anzusetzen - während die relative Feuchtigkeit bei 12°C stark vom Standort abhängen wird (siehe Abbildung 2.40), und
 (ii) berücksichtigt es nicht, dass sich Objekte (u.U. über Jahrhunderte) an die vom Standort geprägten Klimabedingungen angepasst haben. Schon Schlieder [1967] zeigt, dass die von Orgelbauern empfohlenen relativen Feuchtigkeit sehr gut mit dem mittleren Ortsklima korrelieren. Pfeil [1975] fordert entsprechend, dass die relative Feuchtigkeit in der Kirche der in der unbeheizten Kirchen herrschenden mittleren Ausgleichfeuchte entsprechen solle, mit der sich die Einrichtungsgegenstände im Gleichgewicht befinden, und von jener um maximal ±5% abweiche.

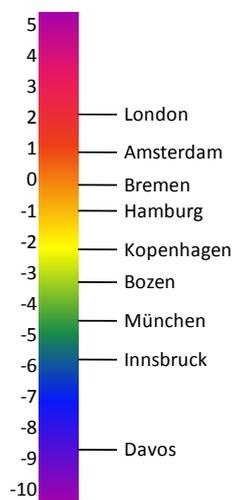


Abbildung 2.40: Taupunkttemperatur im Januar für unterschiedliche Standorte in Europa (siehe Anhang A.5)

Dass das Außenklima die Möglichkeiten, und damit auch die Richtwerte beeinflusst, lässt sich aus den dem Thema „Klima- und Ausstellungsprobleme“ gewidmeten österreichischen Restauratorenblättern [Koller, 1981] ableiten: Im klimatisch härteren Österreich liegen die von den Autoren genannten Maximaltemperaturen tendenziell tiefer als die oben genannten. Beck u. Koller [1981] bemängeln zwar, es gäbe noch immer keine verlässlichen und allgemein gültigen Richtlinien, nennen aber ihrerseits Temperaturen unter 10°C und eine relative

Feuchtigkeit von 50-60% als erfahrungsgemäß gefahrlos; die kritische Temperatur sei 12°C, über die hinaus auf keinen Fall geheizt werden darf, bei Dauerheizung muss die Temperatur mindestens 3-4K unter dieser liegen, beim Intervallheizen soll der Temperaturunterschied nicht mehr als 2-3K betragen. Auch Dulosy [1981] nennt 8-10°C als Grenztemperatur für durchgehende Heizung, sieht aber auch hier schon Befeuchtungsbedarf, um die relative Feuchtigkeit von den sich einstellenden 30-40% anzuheben.

Künzel u. Holz [1991] propagieren bezüglich der relativen Feuchtigkeit maximale Schwankungen von 10% im Tageszyklus und 30% im Jahreszyklus. Insgesamt soll die mittlere Luftfeuchtigkeit 50% nicht unterschreiten und 80% nicht übersteigen. Zur Reduzierung der Tauwassergefährdung empfiehlt er eine Grundtemperatur von mindestens 5-8°C zu halten, was die Gottesdiensttemperatur anbelangt, nennt er 12-16°C angemessen - wobei er anmerkt, dass die Nutzungstemperatur (aus Feuchtesicht gesehen) umso höher sein kann, je niedriger die Grundtemperatur ist, da die sich einstellende mittlere Raumfeuchtigkeit von der mittleren Raumtemperatur bestimmt sei, und Sorptionsvorgänge die relative Feuchtigkeit stabilisieren (eine Theorie, die von den Messungen von Bratsz u. a. [2007] nicht unterstützt wird; sie zeigen, dass es gerade durch die feuchtepuffernden Sorptionsvorgänge zu Schäden kommt).

Umgekehrt hatte Arendt [1986] empfohlen, die Kirchenheizung geregelt zwischen 8°C und 10°C (Nutzung) zu fahren, und bei einer höheren gewünschten Nutzungstemperatur ggf. auch die Grundtemperierung anzuheben, wobei die Temperaturdifferenz nie mehr als 3K betragen darf. Er begründet dies damit, dass die Zeiten, in denen Einrichtung, wie z.B. Holz, auf die Feuchtschwankungen reagiert, nicht in Stunden, sondern in Tagen zu messen ist, und die Anheizrampe deshalb über eine bestimmte Temperaturdifferenz hinaus mehr als Alibi zu sehen ist und es in den oberflächennahen Schichten jedenfalls zu einem ständigen Schwinden und Dehnen kommt. 1989 nennt derselbe Autor [Arendt, 1989] eine maximale Nutzungstemperatur von 12°C, Temperaturdifferenz von 3K, sowie An- und Abheizrampe von 1, besser 0.5K/h den „allgemeinen Stand des technischen Wissens“, weist aber auch auf die - aus holzkonservatorischer Sicht - guten Erfahrungen der westlichen Nachbarn mit instationär betriebenen Luftheizungen hin, die freilich einher geht mit starker Verschmutzung der Raumschale.

	ϑ_i °C	ϑ_g °C	$\Delta\vartheta/\Delta t$ K/h	φ_{Orgel} %	$\Delta\varphi$ %
Badertscher 1965*	≤15	8-10		45-65	
Hennings [1966]	15	8		55-75	$\Delta\vartheta_{Kirchenschiff-Orgel} \leq 2K$
Supper [1967]	17-19	5-7		<60	
Schlieder [1967]	≤15	7-10	<2	50-70	
Knol 1971*	≤15		1.5	<75	$\vartheta_{Orgel} < 15^\circ C, \vartheta_{Zuluft} < \vartheta_i + 25^\circ C$
Stadtmüller [1972]				60-70	
Gossens [1972]	12-15	8-10	1.5-2	50-60	
Schmidt-Thomsen [1973]	12-15	8	<1.5		
Mainz [1973]	12-15	8	<1.5		$\vartheta_{ZuL} \leq 45, v_{ZuL} \leq 2, \vartheta_{Boden} \leq 25$
Pfeil [1975]	12-16			konstant	±5 v=0.15-0.35m/s
Mayer [1981]				40-60	aus Sicht der Glasmalerei
Beck u. Koller [1981]	10			50-60	12°C kritische Temperatur
Dulosey [1981]	8-10			>50	
Arendt [1986]	10	8	0.5-1.5		Maximale Aufheizung 3K
Künzel u. Holz [1991]	12-16	5-8	rasch	50-80	10 bzw. 30 $\Delta\varphi_{Tag} \leq 10\%, \Delta\varphi_{Jahr} \leq 30\%$
Bordass93					
Schellen [2002]	15-20 ≤15 für FH	5-10 ≥8 für GH	2	45-75 40-90**	10 bzw. 30 $\Delta\varphi_{Tag} \leq 10\%, \Delta\varphi_{Jahr} \leq 30\%$ ** kurzfristig

Tabelle 2.7: Vergleich der Empfehlungen in der Literatur für Raumklima in beheizten Kirchen, * nach [Schellen, 2002]

Schon Arendt [1993] hatte die im Laufe der Zeit in der Literatur ausgesprochenen Empfehlungen für Grund- und Aufheiztemperatur sowie Aufheizgeschwindigkeit tabellarisch gesammelt. Schellen [2002] hat die Liste (i) um einige Autoren und (ii) die Angabe von Empfehlungen zu Feuchtigkeit, Geschwindigkeit im Raum, Temperatur- und Geschwindigkeit der Zuluft und Oberflächentemperatur bei Luftheizung erweitert, sowie (iii) an einigen Stellen aufgrund eigener Messungen und Berechnungen ergänzt. Insbesondere lag es ihm am Herzen, die Grenzwerte für Zulufttemperatur und Zuluftgeschwindigkeit durch einen Grenzwert von 0.05 für die Archimedes-Zahl (Verhältnis zwischen Auftrieb und kinetischer Energie einer Strömung) zu ersetzen, der ihm besser geeignet scheint, ein großes Temperaturprofil im Raum zu vermeiden.

3. Situationsanalyse - Kirchenheizung in einer Bergregion

Ein Überblick über die Beheizung von Kirchen in Südtirol (Italien) gibt die erste Phase des an der Eurac durchgeführten Projektes „Kirchenheizung - eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege“. Im Rahmen dieser ersten Phase wurden 31 Kirchen besucht und folgende Informationen aufgenommen:

- Lage und Außenklima
- Raumklima vor, während und nach dem Gottesdienst
- Merkmale von Architektur, Einrichtung und Ausstattung
- Nutzungsart und -häufigkeit
- Heizungssystem und Betriebsweise
- Anschaffungs- und Betriebskosten

3.1 Methode

Die Liste der in dieser ersten Phase zu untersuchenden Kirchen wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Denkmalamt der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol und dem Verwaltungsbüro der Diözese Bozen-Brixen erstellt, mit dem Ziel, eine ausgewogene Verteilung von Heizungssystemen, Kirchengrößen und Standorten zu erhalten. Die Liste mit den jeweiligen Charakteristika der Kirchen ist im Anhang wiedergegeben.

Für jede Kirche wurde ein Vor-Ort-Termin vereinbart, bei welchem vor, während und nach dem Gottesdienst das Raumklima gemessen und die oben aufgezählten Informationen anhand einer Checkliste (siehe Anhang B.1) (i) im Gespräch mit Pfarrer und Sakristan, (ii) durch Anschauung vor Ort und (iii) Durchsicht der Unterlagen aufgenommen wurden. Im Kontakt mit Pfarrer und Sakristan kamen oft auch die Eigenheiten und speziellen Probleme der Kirche zur Sprache, wie z.B. Bereiche, in denen es besonders zieht - und die Kerzen schnell abbrennen oder Christbäume wackeln.

3.1.1 Lage und Außenklima

Für die Höhenlage konnte der offizielle Wert des Südtiroler Statistikamtes [Landesinstitut für Statistik - ASTAT, 1999] herangezogen werden, da in der Regel die Pfarrkirche im Ortszentrum vermessen wurde oder auf jeden Fall eine Kirche in vergleichbarer Höhenlage.

Zur Charakterisierung des Außenklimas wurden Heiztage (HT) und Heizgradtage (HGT) berechnet, und zwar (i) mit den im Wohnungsbau üblichen Werten von 12°C für die Heizgrenztemperatur und 20°C für die Raumtemperatur sowie (ii) an den Fall „Kirchenheizung“ angepassten Werten von jeweils 10°C. Die Berechnung basiert auf Tagesmittelwerten, gemessen vom Hydrographischen Dienst der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol, mit wenigen Ausnahmen gemittelt über 10 Jahre (1989 bis 1998), mindestens jedoch 8 Jahre.

$$HT = \sum_{i=1}^{365} 1 \quad \forall \vartheta_{\text{aue},i} < 12^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

$$HGT = \sum_{i=1}^{365} 20^{\circ}\text{C} - \vartheta_{\text{aue},i} \quad \forall \vartheta_{\text{aue},i} < 12^{\circ}\text{C} \quad (3.2)$$

Stand für eine Kirche keine genügend nahe Messstation zur Verfügung, wurden die Ergebnisse aus den Werten für die nächstgelegene Messstation (HT_M , HGT_M), der Höhendifferenz zu derselben (Δh) und einem aus der linearen Regression über alle untersuchten Messstellen ermittelten Faktor berechnet (siehe Abbildung 3.1):

$$HT = HT_M + 0.0971\Delta h \quad (3.3)$$

$$HGT = HGT_M + 2.1034\Delta h \quad (3.4)$$

3.1.2 Raumklima

Mit dem „heat stress and comfort analyzer“ HSA-832 der Firma TCR Tecora (Sensoren entsprechen den Anforderungen der ISO/DIN 7726) wurden im Aufenthaltsbereich der Kirchgänger (i) die Lufttemperatur, (ii) die Strahlungstemperatur, (iii) die Luftgeschwindigkeit und (iv) die Feuchtigkeit (über die Messung der Feuchtkugeltemperatur) gemessen und in Abständen von jeweils zehn Minuten protokolliert. Zusätzlich wurden Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten sowie Oberflächentemperaturen mit einem Handgerät an verschiedenen Stellen gemessen, um die Gleichmäßigkeit zu untersuchen.

3.1.3 Architektur, Ausstattung und Nutzung

Jede Kirche wurde anhand ihres Volumens einer Größenklasse zugeordnet („klein“: bis etwa 2'000 m³, „mittel“: bis 8'000 m³, „groß“: ab 8'000 m³); sofern weder Pläne der Kirche noch Planungsunterlagen der Heizung zur Verfügung standen, wurde die Größenklasse geschätzt (siehe Anhang B.1).

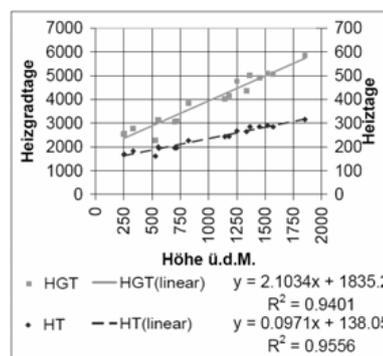


Abbildung 3.1: Heizgradtage (HGT) und Heiztage (HT) über der Höhe ü.d.M. für alle in die Untersuchung eingeflossenen Messstellen, sowie deren lineare Regressionen HGT(linear) resp. HT(linear) inklusive der zugehörigen Gleichungen und erreichten R²



Abbildung 3.2: Messung des Raumklimas im Aufenthaltsbereich

Der Checkliste folgend wurden des Weiteren die folgenden Informationen gesammelt:

- Bestuhlung: Anzahl der Bänke, Vorhandensein eines Bankspiegels, Sitzunterlage
- Türen: Anzahl, Windschutz, automatischer Schließer
- Fenster: Anzahl, Größe, Farbe, 2-fach Verglasung
- Ausstattung: Orgel mit Baujahr, Fresken und Altäre aus Holz, jeweils mit Bemerkungen
- Restaurierungen: Jahr und Objekt der letzten Restaurierung(en)

Zur Beschreibung der Nutzung wurden die Angaben aus dem meist aufliegenden Mitteilungsblatt durch Informationen aus dem Gespräch mit dem Pfarrer ergänzt. Werden in der Kirche Konzerte aufgeführt, wurde die jeweilige Anzahl während der Heizperiode notiert. Aus der Tabelle der Gottesdienste in einer typischen Woche wurden Anzahl und Gesamtzeit bestimmt sowie vier Klassen („Wochenende“, „Wochenende und 1-2 x werktags“, „Wochenende und 3-4 x werktags“, „täglich“) differenziert.

3.1.4 Heizungssystem

Was das Heizungssystem anlangt, wurde in Anlehnung an Arendt [1993] zwischen den folgenden Heizungstypen unterschieden

- Luftheizung (LH), bei welcher über Öffnungen im Boden oder in der Wand warme Luft in den Raum eingebracht wird
- Fußbodenheizung (FH), welche flächig unter dem Bodenbelag oder Bankspiegel installiert ist
- Bankheizung (BH), welche unter der Sitz- und/oder Kniebank befindliche Heizelemente umfasst

Ergänzend wurde die Kategorie „Radiatorenheizung“ (RH) eingeführt, nachdem in einer Kirche ein solches System vorgefunden wurde. Für alle Heizungstypen wurden Brennstoff (Strom, Gas, Heizöl, Hackschnitzel), Heizleistung und Baujahr festgehalten. Das erreichte Temperaturniveau während der Nutzung wurde nach Thermostatangaben oder Angaben von Pfarrer und Sakristan mit „unter 5°C“, „5-8°C“, „8-10°C“, „10-12°C“, „12-15°C“ und „über 15°C“ klassifiziert.

Je nach Heizungstyp wurden ergänzend dazu noch weitere Daten aufgenommen: Kesseltyp (Luft- oder Wassererhitzer), Kanallänge und -isolierung, Filter, Anzahl, Größe und Position der Auslässe und Abzüge, sowie die Heizlufttemperatur

und -geschwindigkeit für die Luftheizung; beheizte Fläche, Anzahl der Heizkreise, Gesamtröhlänge und Bodentemperatur für die Fußbodenheizung; Anzahl der Heizkreise, Heizleistung pro Laufmeter und Vorhandensein sowie Fläche von Heizmatten (im Altarraum) für die Bankheizung; Anzahl der Heizkörper für die Radiatorenheizung.

Bezüglich der Heizweise wurden „stationär“, „instationär mit Grundtemperierung“ und „instationär“ unterschieden, und dementsprechend Grundtemperatur und Nutzungstemperatur festgehalten. Die Regelung und Steuerung erfolgte „händisch“, mit „Thermostat“ oder „Zeituhr“ oder Kombinationen derselben, zudem wurden Aufheizzeit und ggf. Regelungsparameter wie z.B. eine maximale Temperaturerhöhung pro Zeiteinheit notiert.

Die Heizleistung wird in Anlehnung an Arendt [1993] auf das Volumen der Kirche bezogen. Falls zu diesem keine Angaben vorlagen, wurde die Größe geschätzt, im Anhang B.1 sind diese Fälle besonders gekennzeichnet. In die Untersuchung der Heizleistung wurden zudem auch Informationen aus geplanten, aber nicht umgesetzten Anlagen einbezogen, etwa wenn für die Heizanlage einer Kirche mehrere Vorplanungen und Kostenvoranschläge eingeholt worden waren. Hingegen konnte für drei Kirchen die Heizleistung nicht genau bestimmt werden, da die Heizung zum Beispiel Pfarrhaus und Gemeinderäume mitheizt. Insgesamt standen für die Heizleistungsauswertung 33 Fälle zur Verfügung.

Bei den Kosten wurden Anschaffungs- und Betriebskosten unterschieden. Für die Bestimmung der Anschaffungskosten wurden, soweit noch vorhanden, Kostenvoranschläge herangezogen und die Werte anhand des Verbraucherpreisindex ohne Tabakwaren für die Provinz Bozen (online berechenbar unter <http://www.provinz.bz.it/astat> für Zeiträume ab dem Jahr 1962) auf den Wert im Jahr 2000 hochgerechnet und, zur besseren Lesbarkeit, von italienischen Lire in Euro umgerechnet (1936.27 Lire/Euro). Für die Erfassung der Betriebskosten wurden die Rechnungen der letzten Jahre konsultiert. Es wurde des Weiteren zwischen Wartung (Kaminkehrer, Reparaturen, Sonstigem) und Verbrauch (Brennstoffmenge, Brennstoffkosten und ggf. zusätzliche Kosten für elektrische Energie) unterschieden. Leider konnten die Kosten für die Beheizung der Kirche nicht in allen untersuchten Fällen von jenen für die Beheizung anderer Pfarrimmobilien, wie z.B. Widum, Gemeindesaal, Jugendraum o.ä. getrennt werden; wo aufgrund von Angaben der Zuständigen vor Ort Schätzwerte für den

Verteilungsschlüssel herangezogen wurden, ist dies im Anhang vermerkt. Die verbrauchsbezogenen Betriebskosten wurden zudem mit Hilfe der Heizgradtage auf den Standort Bozen normiert:

$$\text{Betriebskosten}_{\text{normiert}} = \text{Betriebskosten} \frac{\text{HGT}_{\text{Bozen}}}{\text{HGT}} \quad (3.5)$$

Darüber hinaus gehende Informationen aus den Unterlagen oder dem Gespräch mit dem Pfarrer wurden jeweils in Bemerkungen festgehalten.

3.2 Heizungssysteme und Betriebsweise

Von den 31 untersuchten Kirchen haben 28 ein reines Luft-, Fußboden-, Bankheizungs- oder Radiatorensystem (18 x LH, 5 x FH, 4 x BH und 1 x RH). Die übrigen 3 Kirchen heizen mit einer Kombination aus Luft- und Bankheizung, Luft- und Fußbodenheizung oder Bank- und Fußbodenheizung. Abbildung 3.3 zeigt, dass beginnend in den 60er-Jahren des 20. Jh. bis in die 80er-Jahre desselben vorwiegend instationäre Luftheizungen eingebaut wurden. Eine Ausnahme ist die stationäre Luftheizung aus dem Jahr 1967 in Niederlana, wo aufgrund des wertvollen Inventars ein konstantes Raumklima gehalten werden soll. Ab Ende der 80er-Jahre werden dann Luftheizungen immer öfter auch stationär oder mit Grundtemperierung betrieben. In den meisten dieser Fälle ist das Kanalsystem schon von der Vorgängerheizung vorhanden. Was erneuert wird, ist der Heizkessel - und eben die Heizweise, meist aufgrund schlechter Erfahrungen (Schwärzung etc.) mit zu schnellem Aufheizen. Ab Ende der 80er-Jahre werden aber immer häufiger auch Fußbodenheizungen eingebaut, in den 90er-Jahren werden Bankheizungen populär.

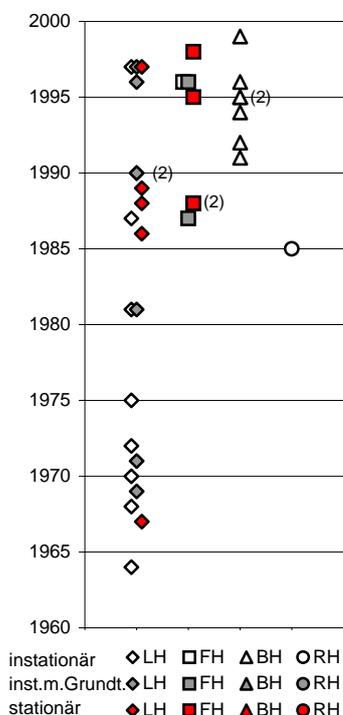


Abbildung 3.3: Einbaujahr der Heizungssysteme in den untersuchten Kirchen

Was die Betriebsweise anlangt, lässt sich die Situation wie folgt zusammenfassen: Mit 14 Kirchen wird nicht ganz die Hälfte der Prüfobjekte nur für die Gottesdienste beheizt, wogegen 8 Kirchen stationär auf eine konstante Temperatur geheizt werden. In 9 Kirchen wird eine Grundtemperatur gehalten (typischerweise 6°C–8°C), und der Raum für die Gottesdienste auf eine höhere Temperatur (typischerweise 10°C–12°C) geheizt. Die installierten Bankheizungen arbeiten praktisch alle instationär, auch deshalb, weil ihr Ziel in der Regel ja nicht das ist, den gesamten Raum zu heizen, sondern im Bankbereich ein akzeptables Klima für die Gottesdienstbesucher zu schaffen. Die Fußbodenheizungen arbeiten in der Regel stationär oder halten eine Grundtemperatur, welche für die Gottesdienste geringfügig erhöht wird. Ausnahme ist hier

die in der Pfarrkirche von Meran im Altarraum installierte Fußbodenheizung, welche die Bankheizung im Kirchenschiff ergänzt und, wie diese, nur für die Gottesdienste aktiviert wird. Bei den Luftheizungen sind alle drei Betriebsvarianten anzutreffen: Bis in die 80er-Jahre herrschen instationär betriebene Luftheizungen vor, während anschließend sowohl bei Neuanlagen als auch bei teilweiser Erneuerung einer bestehenden Anlage praktisch immer zumindest eine konstante Grundtemperatur gehalten wird.

Um die installierte Heizleistung vergleichen zu können, wird sie in Anlehnung an Arendt [1993] auf das Volumen der Kirche bezogen. In Abbildung 3.4 sticht sofort ins Auge, dass bei der Luftheizung (i) der Mittelwert mit $49.8\text{W}/\text{m}^3$ deutlich über den Mittelwerten der Fußbodenheizung ($15.9\text{W}/\text{m}^3$) und Bankheizung ($11.2\text{W}/\text{m}^3$) liegt, und (ii) die Schwankungsbreite mit Werten von $18\text{--}100\text{W}/\text{m}^3$ und einer Standardabweichung von $22.2\text{W}/\text{m}^3$ beträchtlich ist. Bei der Fußbodenheizung liegt das Verhältnis zwischen kleinster und größter spezifischer Leistung etwa bei zwei, bei der Bankheizung ist es wiederum größer. Letzteres liegt auch daran, dass der Bezug der Heizleistung auf das Kirchenvolumen bei Bankheizungen für den Vergleich mit den anderen Systemen zwar interessant ist, aber vom Konzept her wenig sinnvoll. Würde die Heizleistung bei der Bankheizung auf die Bankfläche bezogen, wären die Werte sehr einheitlich. Abbildung 3.5 differenziert wiederum innerhalb der Luftheizung zwischen den verschiedenen Betriebsweisen, und es zeigt sich, dass stationär betriebene Luftheizungen mit einer mittleren spezifischen Leistung von $34.6\text{W}/\text{m}^3$ deutlich unter instationär betriebenen mit $52.7\text{W}/\text{m}^3$, und auch solchen mit Grundtemperierung ($53.4\text{W}/\text{m}^3$) liegen, woraus sich ableiten lässt, dass die Heizleistung der letzten beiden in beträchtlichem Ausmaß für das Aufheizen der Kirche benötigt wird.

21 der besuchten Kirchen verfügen über einen Raumluftthermometer, 5 Systeme messen zudem die Temperatur der Außenluft und in zweien wird die Raumluftfeuchte über Hygrometer erfasst. Die Steuerung erfolgt in 7 Kirchen rein manuell (händisch), d.h. der Pfarrer oder Sakristan schalten die Heizung ein und wieder aus. In zwei weiteren wird die Heizung zwar grundsätzlich manuell gesteuert, ein Raumluftthermostat sorgt jedoch für Abschaltung bei Erreichen der eingestellten Maximaltemperatur. In 6 Kirchen erfolgt die Steuerung allein über eine Zeituhr, in 11 weiteren Kirchen wird zudem die Temperatur über Thermostat kontrolliert. In fünf der sieben stationär beheizten Kirchen hat ein Thermostat die Rege-

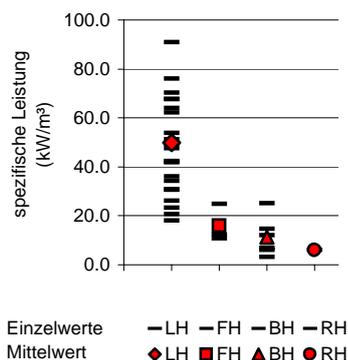


Abbildung 3.4: installierte Heizleistung bezogen auf das beheizte Volumen (kW/m^3), jeweils Einzelwerte und Mittelwert nach Heizungstyp

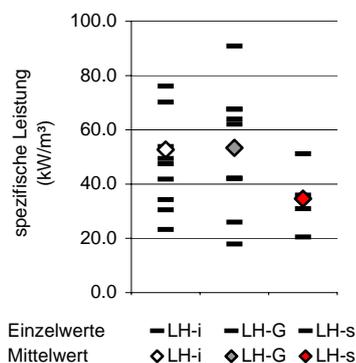


Abbildung 3.5: installierte Heizleistung bezogen auf das beheizte Volumen (kW/m^3), für Luftheizungen, differenziert nach Heizweise

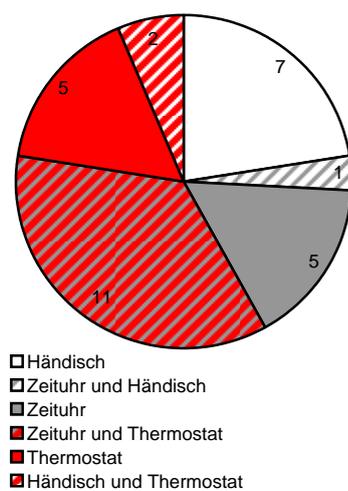


Abbildung 3.6: Heizungssteuerung in den untersuchten Kirchen

lung über, die anderen drei arbeiten zudem mit einer Zeituhr (in Neustift wird nachts geheizt, bei den Eucharistinern und in Wolkenstein tagsüber).

3.2.1 Bankheizung

Bei den Bankheizungssystemen beträgt die Leistung jeweils 150W/m (=Laufmeter Kirchenbank). Zum Vergleich: Eine in der Kirchenbank sitzende Person produziert 100W Wärme und benötigt etwa einen halben Meter Platz - das ergibt bei vollbesetzter Kirche 200W/m. Bei den installierten Systemen handelt es sich in 4 Fällen um Strahlungsrohre, einmal um eine metallene Strahlungsfläche und einmal um eine Hochtemperatur-Strahlerheizung (mit Gitter zum Schutz vor Verbrennungen), ausgeführt in 5 bis 21 Heizkreisen, die jeweils unterschiedlich große Bankblöcke umfassen, und damit die Steuerbarkeit bestimmen. In 4 Kirchen sind reine Sitzbankheizungen installiert, in einer Kirche eine reine Kniebankheizung und in einer eine Kombination von beiden. In zwei Dritteln der Fälle wird die Heizung durch elektrische Heizmatten im Altarraum ergänzt. In der Regel wird die Heizung zwei bis vier Stunden vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet, eine Ausnahme bildet die Pfarrkirche am Reschen, deren Heizung 12 Stunden vor dem Sonntagsgottesdienst in Betrieb genommen wird.

3.2.2 Fußbodenheizung

Die untersuchten Fußbodenheizungen variierten mit beheizten Flächen zwischen 50m² und 750m² beträchtlich in ihrer Größe. Die spezifische Leistung je m² beheizter Fläche hingegen liegt trotz klimatischer Unterschiede mit 150–200W/m² in einem einheitlichen Bereich.

3.2.3 Luftheizung

Die Heizluft der untersuchten Luftheizungssysteme variierte in ihrer maximalen Temperatur zwischen 25°C und 53°C (Mittelwert: 37.2°C) und in ihrer maximalen Geschwindigkeit zwischen 0.5m/s und 3m/s (Mittelwert: 1.75m/s).

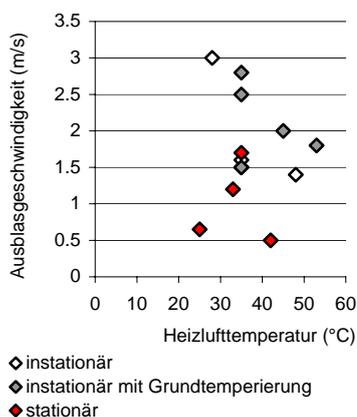


Abbildung 3.7: Maximale Temperatur und Geschwindigkeit der Heizluft am Auslassgitter

Typischerweise wird die Heizluft über ein bis zwei Bodengitter im vorderen Bereich des Kirchenschiffs oder im Altarraum in die Kirche eingeblasen und über ein bis zwei weitere Bodengitter im hinteren Bereich der Kirche abgezogen. Die genaue Positionierung und Anzahl der Bodenöffnungen hängt jeweils von der Geometrie und Ausstattung der Kirche ab. In älteren Anlagen wurden auch bei großen Kirchen unter Umständen nur ein Einlass und ein Abzug installiert (z.B. Dom zu Brixen,

Pfarrkirche Lana), während bei den neueren Anlagen auf eine möglichst verteilte Luftzu- und -abfuhr geachtet wurde (z.B. Franziskanerkirche und Eucharistinerkirche, je in Bozen).

Die Kanäle sind (mit Ausnahmen) zwischen 50 und 70m lang und nicht immer gleich gut isoliert: Bei den Pfarrkirchen in Bruneck und Mals beispielsweise ist der Verlauf der Kanäle im Winter im Kirchhof am geschmolzenen Schnee zu erkennen. Gut die Hälfte der Anlagen hat einen Filter, entweder im Kanal oder am Zuluftgitter.

In knapp über der Hälfte der Anlagen erwärmt der Brenner direkt die Luft, in den übrigen - vor allem in jenen, die nicht nur die Kirche, sondern auch Widum und andere Gebäude heizen - wird das vom Kessel erhitzte Wasser über einen Wärmetauscher (der sich jedoch noch im Heizraum befindet) geführt. In der Stiftskirche in Neustift beispielsweise bedient die Hack-schnitzelheizung, die tagsüber Kloster und Bildungshaus beheizt, nachts die Kirchenheizung.

Typische Vorheizzeit bei instationärem Betrieb sind 1-2 Stunden vor Beginn des Gottesdienstes. Bei Grundtemperierung beginnen 2 Kirchen vier Stunden vor dem Gottesdienst, eine 1.5 Stunden, und 2 eine halbe Stunde auf die Nutzungstemperatur hochzuheizen.

3.3 Temperaturniveau

Die Häufigkeitsverteilung der Nutzungstemperaturen der untersuchten Kirchen zeigt ein deutliches Maximum bei 10°C–12°C, während kaum Kirchen mit Temperaturen unter 5°C respektive über 15°C vorgefunden wurden (siehe Abbildung 3.8).

Um den Einfluss einzelner Parameter auf das Temperaturniveau erkennen zu können, wird in den Abschnitten 3.3.2 bis 3.3.5 ebendiese Häufigkeitsverteilung nach Parametern differenziert dargestellt. Zuvor jedoch soll in Abschnitt 3.3.1 der Zusammenhang zwischen Lage und Temperaturniveau analysiert werden.

3.3.1 Einfluss der Lage

In Abbildung 3.9 sind die Heizgradtage des jeweiligen Standortes für jede untersuchte Kirche nach Nutzungstemperaturklassen aufgetragen, und es wird deutlich, dass bei der Beheizung der Südtiroler Kirchen „das Machbare“ keine geringe

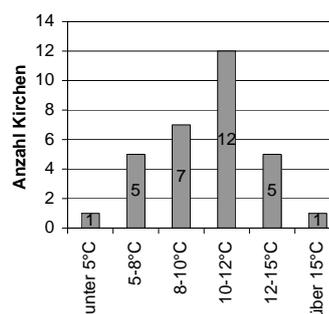


Abbildung 3.8: Häufigkeitsverteilung der Nutzungstemperatur

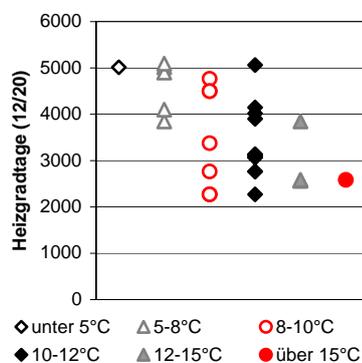


Abbildung 3.9: Zusammenhang zwischen Heizgradtagen und Nutzungstemperatur

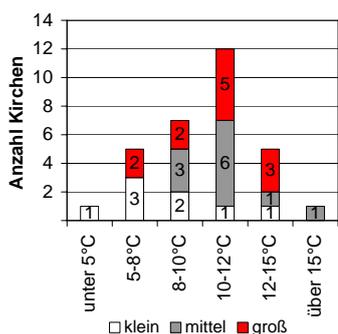


Abbildung 3.10: Häufigkeitsverteilung der Nutzungstemperatur nach Größenklasse

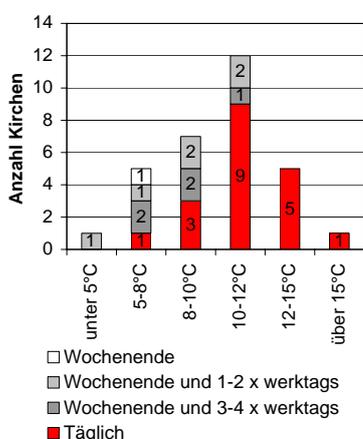


Abbildung 3.11: Häufigkeitsverteilung der Nutzungstemperatur nach Nutzungsfrequenz

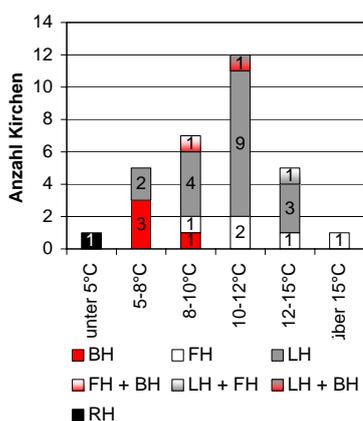
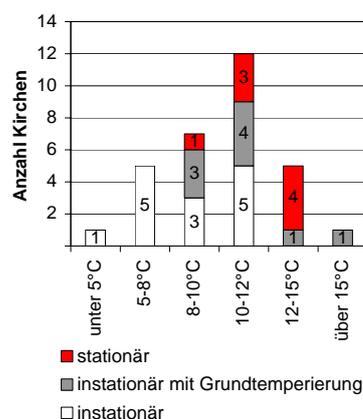


Abbildung 3.12: Häufigkeitsverteilung der Nutzungstemperatur nach Heizungstyp



Rolle spielt: Richtig warm (über 12°C) ist es nur in den wärmeren Gegenden, die kalten Kirchen (unter 8°C) finden sich in den kälteren Regionen. Allerdings ist die Gruppe der Kirchen zwischen 8°C und 12°C gleichmäßig auf alle Klimazonen verteilt, es müssen also noch andere Faktoren eine Rolle spielen.

3.3.2 Einfluss der Größe

Ein solcher Faktor könnte die Größe sein - und es liegt die Frage nahe, ob die Südtiroler hier ebenso pragmatisch vorgehen und die Kirchen stärker aufheizen, je kleiner sind.

Unterteilt man die Säulen der Häufigkeitsverteilung aus Abbildung 3.8 nach Größenklasse lässt sich diese Vermutung leicht überprüfen: Erstaunlicherweise sind es die kleinen Kirchen, die im niedrigen Temperaturbereich vorherrschen, während immerhin drei große Kirchen in die Klasse 12°C–15°C fallen. Von den mittelgroßen Kirchen ist es in einer wärmer als 15°C, die meisten liegen jedoch im Temperaturintervall von 10°C–12°C. Es gibt also Fälle, in denen der größere Aufwand eine große Kirche zu erwärmen, sehr wohl in Kauf genommen wird.

3.3.3 Einfluss der Nutzung

Abbildung 3.11 macht deutlich, woran das liegt: Es sind in erster Linie die häufig genutzten Kirchen, die auf höhere Temperaturen geheizt werden, in den Klassen „12°C–15°C“ und „über 15°C“ kommen nur täglich genutzte Kirchen vor. In diesen Fällen scheint der Anspruch an die Nutzungstemperatur höher zu sein. Zudem kühlt eine Kirche, die täglich genutzt wird, weniger stark aus, es ist dadurch auch leichter, sie zu temperieren.

3.3.4 Einfluss des Heizungstyps

Aber auch der Heizungstyp wirkt sich auf das erreichte Temperaturniveau aus (siehe Abbildung 3.12): Die kälteste Kirche ist jene mit Radiatorenheizung (RH), die warmen Kirchen haben entweder Fußbodenheizung (FH) oder Luftheizung (LH). In Kirchen mit Bankheizung blieb die Temperatur moderat zwischen 5°C und 10°C.

3.3.5 Einfluss der Betriebsweise

Dass die Betriebsweise das Temperaturniveau beeinflusst, war ebenfalls zu erwarten: In den Kirchen, die jeweils für die Gottesdienste beheizt werden („instationär“), steigt die Tempera-

tur nicht über 12°C. In Kirchen, die auf konstanter Temperatur gehalten werden oder durchgehend auf eine Grundtemperatur geheizt werden (mit Temperaturerhöhung für die Gottesdienste), liegt die Nutzungstemperatur hingegen nie unter 8°C; die Hälfte der untersuchten stationär geheizten Kirchen weist Temperaturen zwischen 12°C und 15°C auf.

3.4 Kosten

3.4.1 Betriebskosten

In Abbildung 3.14 sind die Mittelwerte der verbrauchsbezogenen Betriebskosten der einzelnen Kirchen während der letzten Jahre aufgetragen, nach Größenklasse der Kirche gruppiert. Von jährlichen 500 Euro bis zu jährlichen 12'000 Euro reicht das Spektrum. Die großen senkrechten Überlappungsbereiche weisen darauf hin, dass es eine Reihe von mittelgroßen Kirchen gibt, die zu heizen weniger kostet als so manche kleine Kirche. Zwischen den mittelgroßen und großen Kirchen ist der Unterschied noch weniger stark ausgeprägt.

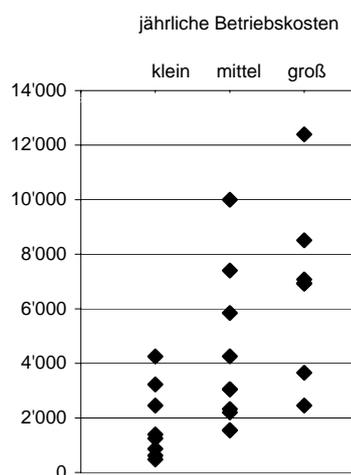


Abbildung 3.14: Betriebskosten in Euro (wertgestellt 1999) für kleine (links), mittlere (Mitte) und große (rechts) Kirchen

Dass dies nicht allein an der unterschiedlichen geographischen Lage liegt, zeigt Abbildung 3.15: Hier sind die auf den Standort Bozen normierten Betriebskosten aufgetragen, und die Überlappungsbereiche bleiben erhalten. Die Einfärbung der Rauten verdeutlicht die Betriebsweise der Heizung: Es ist klar erkennbar, dass die Betriebskosten in den stationär geheizten Kirchen (rot) einer Größenklasse durchwegs höher sind als in jenen mit Grundtemperierung, welche nur für die Gottesdienste auf „Nutztemperatur“ gebracht werden (grau). Dass das instationäre Heizen grundsätzlich kostengünstiger sei, lässt sich hingegen nicht bestätigen - allerdings handelt es sich bei den noch instationär betriebenen in den meisten Fällen um ältere Anlagen, bei denen durch Erneuerung des Kessels, Isolierung etc. ein beträchtliches Einsparpotential gegeben sein dürfte.

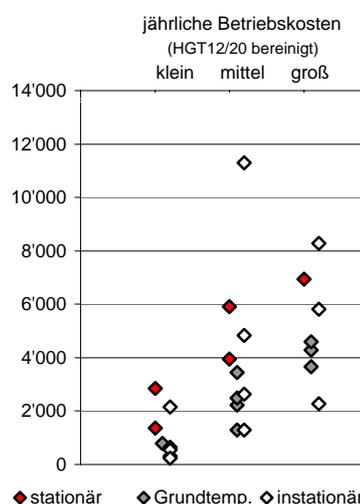


Abbildung 3.15: Betriebskosten in Euro (wertgestellt 1999) für kleine (links), mittlere (Mitte) und große (rechts) Kirchen, nach Betriebsweise der Heizung

Was den Heizungstyp betrifft, lässt sich aus den erhobenen Daten folgern, dass Bankheizungen mit den geringsten Betriebskosten verbunden sind (siehe Abbildung 3.16). Bei Luftheizungen variieren die Kosten sehr stark: Vor allem bei den mittelgroßen Kirchen gibt es sowohl Fälle, in denen sie knapp die Hälfte jener für die mit Bankheizung temperierte Kirche betragen, als aber auch solche, deren Betrieb mehr als das Doppelte kostet.

3.4.2 Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten variieren erwartungsgemäß sehr stark, da sie wesentlich davon abhängen, wie stark in die Struktur eingegriffen werden muss, welche Maßnahmen im Rahmen einer generellen Instandsetzung ohnehin durchgeführt würden (insbesondere, wenn es um Arbeiten im Bereich des Bodens geht), und nicht zuletzt davon, ob auf vorhandene Heizräume und Kanäle zurückgegriffen werden kann.

Bei Bankheizungen ist der Eingriff am geringsten, dementsprechend homogen sind auch die Kosten: Sie liegen bei den vier Anlagen, für welche Informationen vorlagen, zwischen 20'000 und 50'000 Euro. Bezogen auf die Heizleistung bedeutet dies Kosten von 1'000-1'250 Euro/kW, bzw., bei der mittleren installierten Leistung von 150W je Laufmeter Kirchenbank, 150-200 Euro/m. 50–55% der Kosten entfallen auf die Heizelemente selbst, 10–15% auf die Regelung und Steuerung, und die restlichen 30–35% auf Montage, Anschlusskosten und kleinere bauliche Eingriffe.

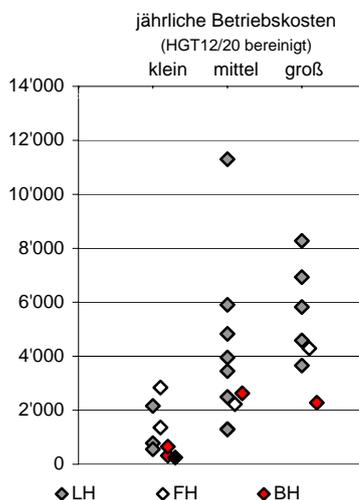


Abbildung 3.16: Betriebskosten in Euro (wertgestellt 1999) für kleine (links), mittlere (Mitte) und große (rechts) Kirchen, nach Heizungstyp

Bei der Fußbodenheizung ist die Schwankungsbreite am größten: Die erhobenen Anschaffungskosten reichen von 14'000 Euro für eine unter den Bänken einer kleinen Kirche eingebaute Lösung bis zu 350'000 Euro im Fall einer großen Kirche, bei welcher der Bodenbelag aus konservatorischen Gründen erhalten werden musste, und entsprechend aufwändig abgenommen und wieder verlegt wurde. Mit 180'000 Euro liegt das dritte Beispiel zwischen den beiden Extremen: 50% der Kosten entfallen hier auf baumeisterliche Arbeiten, 20% auf Heizkessel und Hydraulikerarbeiten, 15% auf Sonstiges wie Planung und Bauleitung, Elektroarbeiten und den Ein- und Ausbau der Bänke - bezeichnenderweise wurden im Kostenvoranschlag weitere 15% für Unvorhergesehenes angesetzt.

Für die Luftheizungen wurden 10'000 bis 80'000 Euro ausgegeben, wobei der Mittelwert bei 35'000 Euro liegt (mit einer Standardabweichung von 24'000 Euro). Die Kosten hängen auch hier wesentlich davon ab, wie stark in die Bausubstanz eingegriffen werden muss. So kann einerseits eine komplette Anlage inklusive Kanäle auch in einer großen Kirche für 35'000 Euro realisierbar sein, wenn sie im Rahmen einer generellen Sanierung umgesetzt wird, und insofern neue Bodenbeläge u.Ä. nicht der Heizung zugerechnet werden, während andererseits allein der Aushub eines neuen Heizraums 40'000 Euro kosten kann. In der Regel entfallen etwa 25–35% der Kosten auf Heizgerät und Brenner und 35–50% auf die Kanäle.

4. Experimentelle Raumklimauntersuchung

In einer zweiten Phase des Projektes „Kirchenheizung - eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege“ wurde in 28 Kirchen über einen Zeitraum von jeweils 4 bis 8 Wochen der Verlauf des Raumklimas aufgenommen. Dies erlaubte es, (i) die typischen Temperaturverläufe während eines Sonntagsgottesdienstes für vier Heizungstypgruppen zu ermitteln, (ii) die Systeme miteinander zu vergleichen sowie ihr Schadensrisiko zu bewerten und (iii) speziell im Fall von Luftheizungen den Einfluss unterschiedlicher baulicher Parameter auf die „Performance“ zu untersuchen.

4.1 Methode

4.1.1 Datenerhebung

Die Messung des Raumklimas erfolgte jeweils über einen Zeitraum von 4 bis 8 Wochen mit 12 bis 25 autonomen Temperaturloggern, welche alle 5 Minuten einen Wert speicherten. Die Datenlogger waren so im Raum verteilt, dass Informationen über Aufenthaltsbereich, Wandoberflächen, vertikale Profile, Zonen von besonderem Interesse (Orgel, Hochaltar, ...) und Außenbereich gewonnen wurden. Alle Sensoren waren so positioniert, dass sie nicht direkt von der Sonne oder dem warmen Fußboden (im Falle einer Fußbodenheizung) bestrahlt wurden.

Beschreibung	Kommentar
Aufenthaltsbereich	unter den Bänken (oder bei der Gesangsbuchablage), Volksaltar, Ambo
Wandoberflächen	in unterschiedlichen Höhen, Sensor in direktem Kontakt mit der Wandoberfläche
vertikale Profile	je nach Höhe 3–5 Sensoren je Profil, i.d.R. je ein Profil vorn und hinten
Zonen von besonderem Interesse	Orgel, Hochaltar, ...
Außenbereich	

Tabelle 4.1: Verteilung der Datenlogger

Die Datenlogger am Altar, auf der Orgelempore und außen verfügten außerdem über einen Feuchtigkeitssensor. Da sich die absolute Feuchtigkeit in Abwesenheit lokaler Quellen oder Senken gleichmäßig im Raum verteilt [Arendt, 1994], wurde aus diesen Messwerten die relative Feuchtigkeit auch für andere Messstellen (beispielsweise die relative Feuchtigkeit unter der Decke) berechnet:

Aus der Definition der relativen Feuchtigkeit φ als Verhältnis von Wasserdampfpartialdruck e zu Sättigungsdruck $e_{\text{sat}}(\vartheta)$

$$\varphi = \frac{e}{e_{\text{sat}}(\vartheta)} \quad (4.1)$$

erhält man für die relativen Feuchtigkeiten der beiden Messstellen

$$\varphi_{m1} = \frac{e}{e_{\text{sat}}(\vartheta_{m1})} \quad (4.2)$$

$$\varphi_{m2} = \frac{e}{e_{\text{sat}}(\vartheta_{m2})} \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow \varphi_{m2} = \varphi_{m1} \frac{e_{\text{sat}}(\vartheta_{m1})}{e_{\text{sat}}(\vartheta_{m2})} \quad (4.4)$$

und unter Einsetzen der Magnusformel (für flüssiges Wasser, das Vorhandensein von Eis wurde ausgeschlossen)

$$e_{\text{sat}} = e_{\text{sat}}(0) \cdot 10^{\frac{7.5\vartheta}{237.3+\vartheta}} \quad (4.5)$$

folgende Berechnungsformel für die relative Feuchtigkeit

$$\varphi_{m2} = \varphi_{m1} \cdot 10^{\frac{7.5\vartheta_{m1}}{237.3+\vartheta_{m1}} - \frac{7.5\vartheta_{m2}}{237.3+\vartheta_{m2}}} \quad (4.6)$$

Zum Einsatz kamen Onset-Datenlogger der Serien Hobo H8 (Innenbereich) sowie Hobo H8 Pro (Außenbereich):

- HOBO Temp (H08-001-02) mit Temperatursensor
 Messbereich -20°C bis 70°C , Messgenauigkeit ± 0.67 K, Ansprechzeit (t_{90}) 1 Minute bei aus dem Gehäuse geführtem Sensor, Speicherkapazität 7944 Werte
- HOBO RH/Temp (H08-003-02) mit Temperatur- und Feuchtigkeitssensor
 Temperatursensor siehe oben
 Feuchtigkeitssensor: Messbereich 25 % bis 95 % (bei 25°C), Messgenauigkeit ± 5 %, Ansprechzeit 10 Sekunden
- HOBO Pro RH/Temp (H08-032-08) mit Temperatur- und Feuchtigkeitssensor für den Außenbereich
 Temperatursensor: Messbereich -30°C bis 50°C , Messgenauigkeit ± 0.1 K im hochauflösenden Modus
 Feuchtigkeitssensor: Messbereich 0 % bis 100 %, Messgenauigkeit ± 3 % bei Temperaturen zwischen 0°C und 50°C , Ansprechzeit (t_{90}) unter 5 Minuten
 Speicherkapazität 32645 Werte (hochauflösender Modus)



Abbildung 4.1: Vorbereitung der HOBO Datenlogger vor Ort

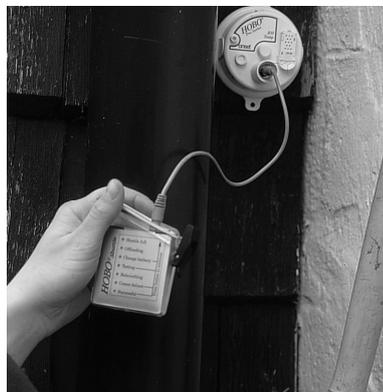


Abbildung 4.2: HOBO Pro Datenlogger für den Außenbereich mit Auslesegerät



Abbildung 4.3: Befestigung eines HOBO Datenloggers zur Messung der Oberflächentemperatur an der Wand

4.1.2 Heizungskategorien

Die Heizungssysteme wurden in sechs Kategorien gruppiert: instationäre Luftheizung (LH1), Luftheizung mit Grundtemperierung (LH2), elektrische Bankheizung (BH), Fußbodenheizung (FH), Konvektorenheizung (KH) und Gasstrahlerheizung (GH). Da von den letzten beiden jeweils nur ein Beispiel untersucht wurde, beziehen sich die im folgenden beschriebenen Analysen im Wesentlichen auf die ersten vier Kategorien.

Für die Kirchen mit Luftheizung wurde zudem der Einfluss der folgenden Parameter untersucht:

- Betriebsweise: instationär – Grundtemperierung
- Position des Luftauslasses: Wand – Boden
- Vorheizzeit: kurz – lang (>1 Stunde)
- Heizlufttemperatur: hoch (>35°C) – niedrig (<35°C)
- Nutzungshäufigkeit: täglich – nicht täglich

Die untersuchten Kirchen und jeweiligen Werte der Parameter sind Troi u. Hausladen [2006] publiziert sowie hier in den Tabellen C.1 bis C.3 im Anhang hinterlegt.

Die nach Abschnitt 4.1.4 berechneten Kennwerte wurden für die Analyse des Einflusses der Parameter jeweils entsprechend gruppiert und gemittelt.

4.1.3 Qualitative Untersuchung

Für jede einzelne untersuchte Kirche wurden die Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe graphisch und analytisch ausgewertet, indem (i) typisches Werktags- und Sonntagsverhalten ermittelt und grafisch dargestellt, (ii) die Gleichmäßigkeit im Aufenthaltsbereich untersucht, (iii) die vertikale Temperaturprofile analysiert und (iv), was die Feuchtigkeit betrifft, Phasen mit Kondensationsrisiko ermittelt sowie (v) die Schwankung der relativen Feuchtigkeit bewertet wurden. Von den Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufen an Sonntagen wurden für jede Heizungskategorie aus den Grafiken für die einzelnen Kirchen typische Verläufe ausgewählt.

4.1.4 Quantitative Untersuchung

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der einzelnen Kirchen anhand von Kennwerten miteinander verglichen. Insgesamt wurden 89 Kennwerte berechnet, für deren Berechnungsalgorithmen auf [Troi, 2002a] verwiesen sei, für die Werte auf Anhang C.2. Auf einen reduzierten Datensatzes war die Methode schon in Troi u. Hausladen [2002] angewandt wor-

den.

Die folgenden acht Kennwerte werden zum Vergleich der vier Heizungskategorien in Abschnitt 4.3 herangezogen:

- $\vartheta_{L,m}$ Mittelwert Raumlufttemperatur (56)
Mittelwert über die vertikalen Profile und Messstellen auf der Orgelepore, nicht jedoch die Messstellen im direkten Aufenthaltsbereich
- $\vartheta_{L,g}$ Gottesdienst-Mittelwert Raumlufttemperatur (83)
Mittelwert über Messstellen wie oben, berechnet für jeden einzelnen Gottesdienst, und anschließend gemittelt
- $\vartheta_{L,m} - \vartheta_{L,g}$ Differenz dieser beiden Werte als Kennwert für die Temperaturzunahme während des Heizens
- $\vartheta_{A,g}$ Gottesdienst-Mittelwert Aufenthaltsbereich (80)
Mittelwert über Messstellen im Aufenthaltsbereich (Bänke, Ambo, Volksaltar), berechnet für jeden einzelnen Gottesdienst, und anschließend gemittelt
- $\vartheta_{W,m}$ Mittelwert Wandtemperatur (55)
Mittelwert über alle Messstellen nicht beheizter Oberflächen
- $\Delta\vartheta_{L-W,h}$ Mittelwert Delta(Raumluft-Wand) beim Heizen (54)
Mittelwert über die Differenz zwischen Raumlufttemperatur (Messstellen siehe oben) und Wandtemperatur (Messstellen siehe oben) während des Heizens
- $\Delta\vartheta_{L-A,h}$ Differenz zwischen Raumlufttemperatur und Aufenthaltsbereich (67)
Mittelwert über Messstellen unter der Decke minus Mittelwert über Messstellen im Aufenthaltsbereich während des Heizens
- $\varphi_{min,h}$ Mittelwert der RH-Minima (26, 34, 42)
Für jede der Heizzeiten in der Messperiode wird das jeweilige Minimum ermittelt; über diese Werte wird anschließend der Mittelwert gebildet.
- $\Delta\varphi_h$ Mittelwert der RH-Differenzen (25, 33, 41)
Für jede der Heizzeiten in der Messperiode wird die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wert ermittelt; über diese Werte wird anschließend der Mittelwert gebildet.
- Anteil der Zeit mit Kondensationsgefahr (Taupunkt Abstand kleiner 1 Kelvin) (23)
Die Zeit, in welcher die Wandtemperatur (der kältesten Messstelle) weniger als 1 Kelvin über der Taupunkttemperatur der Luft liegt, bezogen auf die gesamte Messperiode.

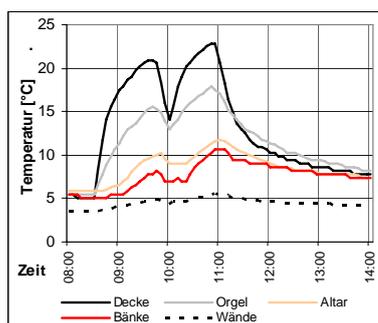


Abbildung 4.4: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit instationärer Luftheizung

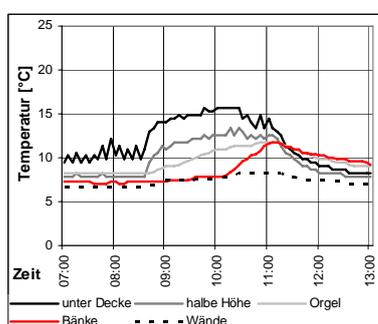


Abbildung 4.5: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Luftheizung und Grundtemperierung

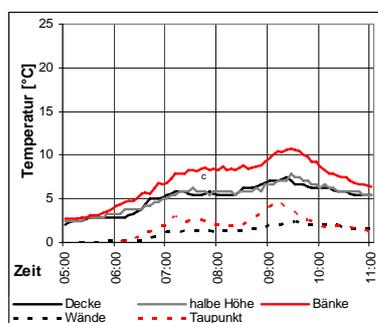


Abbildung 4.6: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Bankheizung

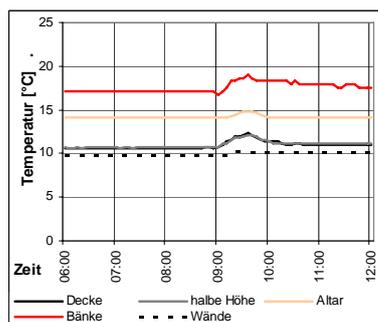


Abbildung 4.7: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Fußbodenheizung

4.2 Beschreibung typischer Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe

4.2.1 Luftheizung instationär

Bei den untersuchten Kirchen mit instationären Luftheizungen steigt die Temperatur im Gewölbe jeweils ziemlich schnell und stark an. Die Luft ist im Kirchenraum (und damit ist hier und im Folgenden der Luftraum über dem eigentlichen Aufenthaltsbereich gemeint) beträchtlich wärmer als im Aufenthaltsbereich. Im letzteren steigt sie oft erst an, sobald die Gläubigen in den Bänken Platz nehmen (der Unterschied zwischen stark besuchten Sonntagsgottesdiensten und schwach besuchten Werktagsgottesdiensten ist in den Verläufen klar erkennbar). Die Temperatur der Wandoberflächen liegt zu Heizbeginn knapp unter der Lufttemperatur, steigt aber während des Heizens kaum an - entsprechend groß ist das Kondensationsrisiko.

4.2.2 Luftheizung mit Grundtemperierung

Wird in der Kirche hingegen eine konstante Grundtemperatur (von ca. 6–10°C) gehalten, ist die Temperaturdifferenz zwischen Gewölbe und Aufenthaltsbereich deutlich kleiner. Auch in diesem Fall ändert sich die Wandtemperatur beim Heizen kaum, aber sie liegt dank Grundtemperierung bedeutend höher, und entsprechend geringer ist das Kondensationsrisiko.

4.2.3 Bankheizung

Mit Bankheizung ist es im Aufenthaltsbereich am wärmsten, aber auch die Temperatur der Luft in höheren Gefilden steigt während des Heizens an. Die Temperatur der Wandoberflächen ändert sich nur wenig, und da diese in der Regel recht kalt sind, wird bei zusätzlichem Feuchteintrag (z.B. durch die Kleidung der Gottesdienstbesucher bei nassem Wetter) relativ häufig der Taupunkt unterschritten. Dass der Temperaturanstieg im Raum insgesamt eher gering ist, liegt auch daran, dass die installierte Leistung von 200 W/m bezogen auf das Volumen der Kirchen klein ist.

4.2.4 Fußbodenheizung

In Kirchen mit Fußbodenheizung wurden grundsätzlich ziemlich hohe Temperaturen beobachtet. Auch in diesem Fall ist es im Aufenthaltsbereich am wärmsten, und die Temperatur nimmt mit steigender Höhe ab. Die untersuchten Kirchen werden jeweils kontinuierlich beheizt, entsprechend ruhig ist der Temperaturverlauf. Als Folge der hohen Lufttemperatur wurde oft eine konstant niedrige relative Luftfeuchtigkeit beobachtet.

4.3 Vergleichende Auswertung

Die beobachtete mittlere Raumlufttemperatur $\vartheta_{L,m}$ variiert deutlich von Heizungssystem zu Heizungssystem: 3.9°C sind es im Mittel für die Bankheizung, 6.4°C für die instationäre Luftheizung, 8.9°C für Luftheizung mit Grundtemperierung und 12.3°C für die Fußbodenheizung (Abbildung 4.8 a).

Während der Sonntagsgottesdienste ist die Situation hingegen wesentlich ausgeglichener: Die Raumlufttemperaturen liegen zwischen 11.5°C und 14°C, nur die Kirchen mit Bankheizung weichen mit mittleren 7.5°C wesentlich ab (Abbildung 4.8 b).

Die Temperaturzunahme während des Heizens bei den Kirchen mit instationärer Luftheizung beträgt $7.3^{\circ}\text{C} \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ (Standard Error S.E.). Für Luftheizung mit Grundtemperierung und Bankheizung ist diese Temperaturzunahme wesentlich geringer ($2.6^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ bzw. $3.9^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$), im zweiten Fall jedoch auf einem weit niedrigeren Temperaturniveau. Da die Fußbodenheizungssysteme durchgehend in Betrieb sind, ist der Temperaturanstieg zu den Gottesdiensten vernachlässigbar klein und im Wesentlichen auf die Heizleistung der Gläubigen zurückzuführen (Abbildung 4.8 c).

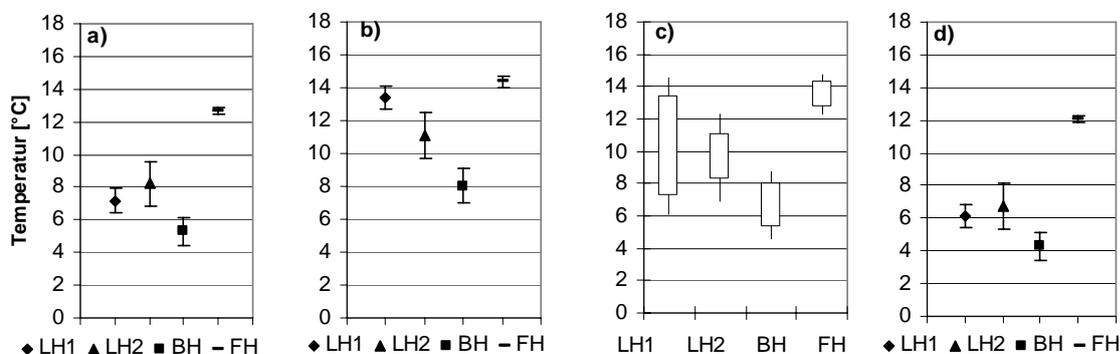


Abbildung 4.8: a) Mittelwert Raumlufttemperatur, b) Gottesdienst-Mittelwert Raumlufttemperatur, c) Differenz von Mittelwert und Gottesdienst-Mittelwert der Raumlufttemperatur als Kennwert für die Temperaturzunahme während des Heizens, d) Mittelwert Wandoberflächentemperatur

Auch die Temperatur der Wandoberflächen ist dank des durchgehenden Heizens im Fall der Fußbodenheizung entsprechend hoch. Bei der Bankheizung hingegen ist sie sehr niedrig (2.6°C). Teilweise wurden in den untersuchten Kirchen sogar Werte unter dem Gefrierpunkt gemessen (Abbildung 4.8 d).

Luftheizungssysteme neigen dazu, die Kirche von oben nach

unten aufzuheizen: Bei instationärem Betrieb ist es während der Heizperioden unter der Decke 5.4°C wärmer als im Aufenthaltsbereich, mit Grundtemperierung beträgt die vertikale Temperaturdifferenz immerhin noch 2.2°C (Abbildung 4.9 a). Zu berücksichtigen ist hierbei zudem, dass es sich um Mittelwerte über die gesamte Heizperiode handelt und gerade bei der instationären Luftheizung die maximale vertikale Temperaturdifferenz am Ende des Gottesdienstes auftritt (Abbildung 4.4). Mit Bankheizung und Fußbodenheizung ist es im Aufenthaltsbereich wärmer als unter der Decke, die Differenz ist deshalb negativ aufgetragen.

Auch die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Wandoberfläche ist für die instationäre Luftheizung mit einem Mittelwert von 4.8°C am größten (Abbildung 4.9 b). Mit Grundtemperierung sind die Wände wärmer, und die Differenz zur Lufttemperatur ist kleiner. Am geringsten ist der Temperaturunterschied zwischen Luft und Wand bei der durchgehend betriebenen Fußbodenheizung.

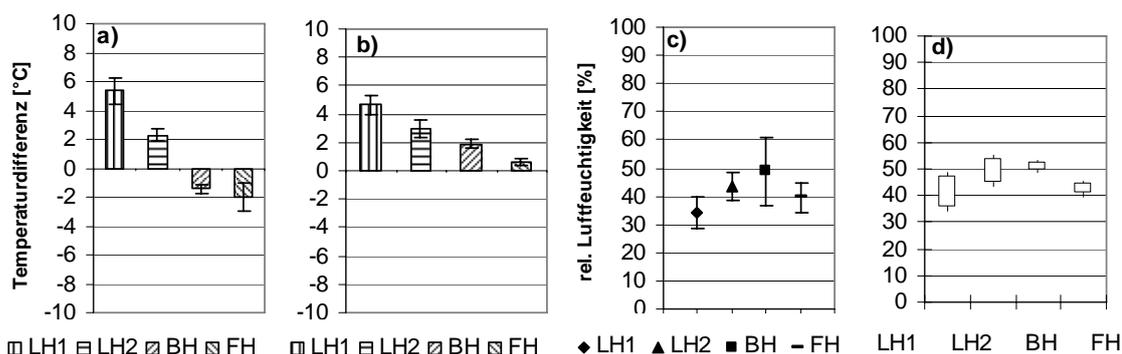


Abbildung 4.9: a) Differenz zwischen Raumlufttemperatur und Aufenthaltsbereich während des Heizens b) Mittelwert über die Differenz zwischen Raumlufttemperatur und Wandtemperatur während des Heizens c) Mittelwert der RH-Minima beim Heizen d) Mittelwert der RH-Differenzen beim Heizen

Beim Heizen sinkt die relative Feuchtigkeit der Luft ab. Abbildung 4.9 c zeigt die für die einzelnen Heizungssysteme im Mittel während der Heizperioden erreichten Minima: unter 40% für instationäre Luftheizung, bedingt durch den beträchtlichen Temperaturanstieg, um 55% für die gemäßigeren Temperaturanstiege bei der Luftheizung mit Grundtemperierung, relativ hohe 60% bei den vergleichsweise niedrigen Temperaturen der Bankheizung und weniger als 35% bei der Fußbodenheizung. Im letzteren Fall ist der Wert konstant niedrig (Abbildung 4.9 d). Die instationäre Luftheizung hingegen zeigt große Schwankungen mit einem mittleren Abfall der relativen Feuchtigkeit beim Heizen von 16%.

Ein wiederholtes Unterschreiten der Taupunkttemperatur konnte vor allem in Kirchen mit Bankheizung beobachtet werden, allerdings in sehr unterschiedlichem Ausmaß (Kondensationsgefahr in 1% bis 30% der Messperiode). Aber auch bei der instationären Luftheizung konnte bei niedrigen Temperaturen und zusätzlich eingebrachter Feuchte (z.B. durch viele Gottesdienstbesucher an hohen Feiertagen oder durch den Luftkanal) Kondensationsrisiko festgestellt werden.

In Zusammenschau mit den in Abschnitt 2.3 dargestellten Zusammenhängen zwischen Raumklima und Schäden an Ausstattung und Gebäude lassen sich aus obigen Ergebnissen die folgenden Schlüsse bezüglich der Schadensträchtigkeit der einzelnen Heizungskategorien ziehen:

Da hölzerne Ausstattung auf Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit ausgleichend reagiert, und dementsprechend schwindet oder quillt, können niedrige Werte relativer Luftfeuchtigkeit zu Rissen und Lockerungen führen. Abbildung 4.9 c zeigt, dass diesbezüglich besonders Fußbodenheizung und instationäre Luftheizung schlecht abschneiden; wobei bei Ersterer die Werte konstant niedrig sind, was bevorzugt zu Schwindrissen führt, während es bei Zweiterer zu vielen kurzen Spitzen kommt, deren Schadenspotenzial von der Amplitude der Schwankungen, aber auch deren Ausgangswert und Häufigkeit sowie nicht zuletzt der Ausstattung selbst abhängt, wie in Abschnitt 2.3.1 dargelegt wurde. Insbesondere die Arbeiten von Kozłowski [2000]; Kozłowski u. Bratasz [2003] und Bratasz u. a. [2005, 2007], zeigen eindrucksvoll die Wirkung auch kurzfristige Einbrüche der relativen Feuchtigkeit.

Farbfassungen und Malschichten leiden stark unter zyklischen Schwankungen, da sie in anderem Maße als ihre hölzerne oder textile Unterlage quellen und schwinden, und daher periodisch gestaucht und gestreckt werden, bis sie schließlich brechen und abblättern (siehe auch Abschnitt 2.3.1, insbesondere Abbildung 2.12). Aus Abbildung 4.9 d ist ersichtlich, dass in dieser Hinsicht die wiederholten kurzen aber intensiven Heizperioden der instationären Luftheizung als besonders kritisch zu werden sind.

Um Wände und andere Oberflächen vor übermäßiger Schwärzung zu schützen, sollten (i) Luftgeschwindigkeit und Turbulenz an der Oberfläche klein sein, da sie das Absetzen von Partikeln begünstigen, und (ii) die Oberflächen selbst warm sein, um dadurch sowohl das Absetzen der Partikel (durch Stefan flow) als auch eine verstärkte Adhäsion wegen der



Abbildung 4.10: Schmutzfahne über dem Warmluftauslass im Bozner Dom

Kapillarkondensation zu vermeiden. Luftbewegungen können durch räumliche Temperaturdifferenzen induziert werden, Luftgeschwindigkeit und Turbulenz an den Oberflächen werden durch den Temperaturgradienten zwischen Wand und Luft verstärkt: In beiden Fällen schneidet die instationäre Luftheizung am schlechtesten ab (siehe Abbildungen 4.9 a und 4.9 b). Bei Luftheizung mit Grundtemperierung und Bankheizung ist der Temperaturgradient zur Wand ebenfalls nicht klein, bei letzterer ist das Risiko noch verschärft durch das niedrige Temperaturniveau der Wände und die dadurch erhöhte Kondensationsneigung (Abbildung 4.8 d). Dank höherer Wandtemperatur und kleiner Gradienten scheint die Fußbodenheizung bezüglich Schwärzung das geringste Schadensrisiko aufzuweisen; tatsächlich wurde in den untersuchten Kirchen mit Fußbodenheizung kaum Schwärzung beobachtet, andererseits weist Arendt [1993] sehr wohl auf Schwärzung bei Fußbodenheizung hin.

Das Raumklima hängt selbstverständlich nicht nur vom Heizungssystem ab. Auch Außenklima, Größe und Baustil der Kirche sowie die Nutzungshäufigkeit sind wichtig. Allerdings zeigen die Ergebnisse klar gewisse grundlegende Charakteristiken der unterschiedlichen Heizungssysteme und Betriebsweisen.

4.4 Luftheizung ist nicht gleich Luftheizung

Das am häufigsten vorkommende Heizungssystem in Südtiroler Kirchen ist die Luftheizung. In Abschnitt 4.3 wurde gezeigt, dass diese bei instationärem Betrieb das schadensträchtigste aller untersuchten Systeme ist. Allerdings unterscheiden sich die untersuchten Systeme beträchtlich untereinander, weshalb über die grobe Unterscheidung „instationär“ und „mit Grundtemperierung“ hinaus noch weitere Parameter auf ihren Einfluss auf das Raumklima hin untersucht wurden (siehe Abschnitt 4.1.2).

Im Aufenthaltsbereich liegt die Temperatur während der Gottesdienste in den meisten Fällen zwischen 10°C und 11°C und hängt wenig von den Gruppierungsparametern (Abbildung 4.11a) ab - mit Ausnahme der Vorheizzeit: In den länger geheizten Kirchen ist es mit 11.6°C um mehr als 2 K wärmer als in den kürzer geheizten (9.2°C).

Die mittlere Raumtemperatur (in erster Linie die Messstellen der vertikalen Profile) während der Gottesdienste schwankt

zwischen 12°C und 14°C (Abbildung 4.11b): Es ist ungefähr 2K wärmer, wenn (i) die Heizung nur für die Gottesdienste in Betrieb genommen wird, (ii) der Luftauslass sich in der Wand befinden, (iii) nur kurz vorgeheizt wird oder (iv) die Heizlufttemperatur niedrig ist. Die Nutzungshäufigkeit hingegen hat keinen nennenswerten Einfluss.

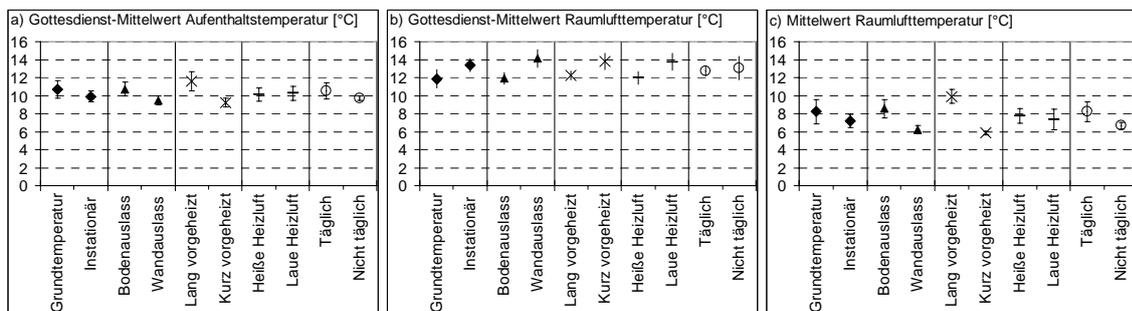


Abbildung 4.11: a) Gottesdienst-Mittelwert der Lufttemperatur im Aufenthaltsbereich, b) Gottesdienst-Mittelwert der gesamten Raumlufttemperatur, c) Mittelwert der Raumlufttemperatur über die gesamte Messperiode (Temperaturangaben in Kelvin)

Interessanterweise ist obige Raumtemperatur über die gesamte Messperiode gemittelt für beide Betriebsweisen sehr ähnlich (8.2°C für Grundtemperierung und 7.2°C für instationären Betrieb, siehe Abbildung 4.11c), variiert aber stark mit der Vorheizzeit (9.9°C für langes versus 5.8°C für kurzes Vorheizen). Außerdem beeinflusst die Position des Luftauslasses den Wert.

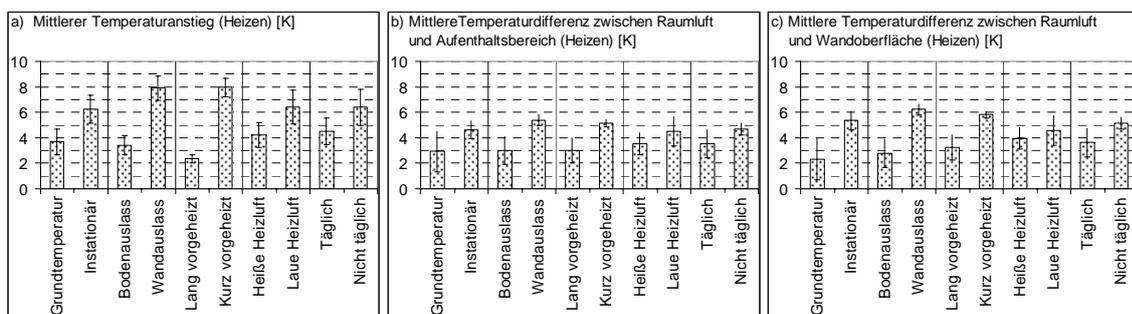


Abbildung 4.12: a) Gottesdienst-Mittelwert der Lufttemperatur im Aufenthaltsbereich, b) Gottesdienst-Mittelwert der gesamten Raumlufttemperatur, c) Mittelwert der Raumlufttemperatur über die gesamte Messperiode (Temperaturangaben in Kelvin)

Die Zunahme der Temperatur während des Heizens (Abbildung 4.12a) variiert beträchtlich – von 2.4 K bis 8 K. Während sie in Kirchen mit Grundtemperierung weniger als 4 K beträgt (von 8.2°C auf 11.9°C), führt Heizen nur zu Gottesdiensten zu einer Temperaturzunahme von mehr als 6 K (von 7.2°C auf 13.4°C). Am größten ist der Unterschied für unterschiedliche Vorheizzeiten (2.4 K für langes, 8 K für kurzes Vorheizen), aber auch die Position des Luftauslasses spielt eine wichtige

Rolle (3.4 K für Bodenauslass versus 7.9 K für Wandauslass).

Des Weiteren zeigt die Untersuchung der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Aufenthaltsbereich (Abbildung 4.12b), dass dieser Gradient für Kirchen mit (i) Wandauslass (6.2 K) oder (ii) kurzen Vorheizzeiten (5.8 K) am größten ist. In diesen Fällen ist es unter der Decke am wärmsten, während die Temperatur bei Grundtemperierung, Bodenauslass und längerer Vorheizzeit gleichmäßiger verteilt ist.

Die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Wand (Abbildung 4.12c) ist in Kirchen mit Grundtemperierung am wenigsten ausgebildet (2.9 K), während sie für instationäres Heizen (4.6 K), und insbesondere für kurzes Vorheizen (5.1 K) groß ist.

Abbildung 4.13a) zeigt die mittleren Minima der relativen Feuchtigkeit beim Heizen: Sie liegen unter 40% für (i) instationäres Heizen, (ii) Wandauslass, (iii) kurzes Vorheizen und (iv) niedrige Heizlufttemperatur – was mit der beträchtlichen Temperaturzunahme in diesen Fällen (siehe Abbildung 4.12a) korreliert. Der mittlere Abfall der relativen Feuchtigkeit beim Heizen (Abbildung 4.13b) ist in Kirchen mit Wandauslass (19.4%) und kurzem Vorheizen (16.4%) am größten.

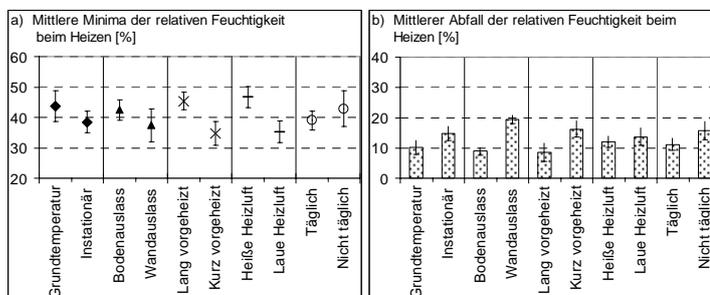


Abbildung 4.13: a) mittlere Minima der relativen Feuchtigkeit beim Heizen b) mittlerer Abfall der relativen Feuchtigkeit beim Heizen (relative Feuchtigkeit in %)

Aus denkmalpflegerischer Sicht bedeutet dies wiederum, dass beim Vorhandensein von wertvoller Holzeinrichtung und gefasstem oder bemaltem Inventar das Heizen nur für die Gottesdienste, insbesondere mit Wandauslass und kurzer Vorheizzeit, vermieden werden sollte (Abbildungen 4.13a und b). Gilt es, Wände und Oberflächen vor Verschmutzung zu schützen, sollte eine Grundtemperatur gehalten oder zumindest über längere Zeit vorgeheizt werden, sowie der Luftauslass nicht in der Wand sein (Abbildungen 4.12b und c).

4.5 Spezielle Überlegungen anhand von Beispielen

4.5.1 Aufheizrampe mit „Sägezahn“-Muster

Aus Denkmalpflege-Gründen wird in der Regel empfohlen, bei Grundtemperierung und Anhebung der Temperatur für die Gottesdienste, diese um maximal 1°C pro Stunde zu erhöhen.

In solchen Fälle wäre es wünschenswert, wenn sich die Temperaturregelung nicht auf einen einzelnen Sensor im Aufenthaltsbereich bezöge und außerdem die Heizleistung und Zulufttemperatur moduliert werden könnten - ansonsten ist ein „Sägezahn“-Anstieg zu erwarten, wie er in der Franziskaner-Kirche in Bozen gemessen wurde:

Die Franziskanerkirche in Bozen wird durch eine Luftheizung, die in den 90er Jahren eingebaut worden war, auf einer Grundtemperatur von 10°C gehalten. Für die Gottesdienste wird die Temperatur auf 14°C erhöht - und zwar 4 Stunden vor dem ersten Gottesdienst, um 6.00 Uhr beginnend und um jeweils 1°C pro Stunde.

Da aber die Temperatur im Luftraum der Kirche wesentlich schneller steigt als im Aufenthaltsbereich, herrschen oben schon über 16°C, wenn der Sensor im Aufenthaltsbereich das Erreichen von 1K Aufheizen meldet - und die Heizung für die nächste Stunde abschaltet, denn die Heiztemperatur kann nicht moduliert werden. Diese Kombination aus ungenügender Anzahl von Sensoren und nur im Ein/Aus Modus regelbarer Heizung führt zum in Abbildung 4.14 gut erkennbaren „Sägezahn“-Muster, das dem Ansatz der 1 K/h-Aufheizung in keinsten Weise gerecht wird.

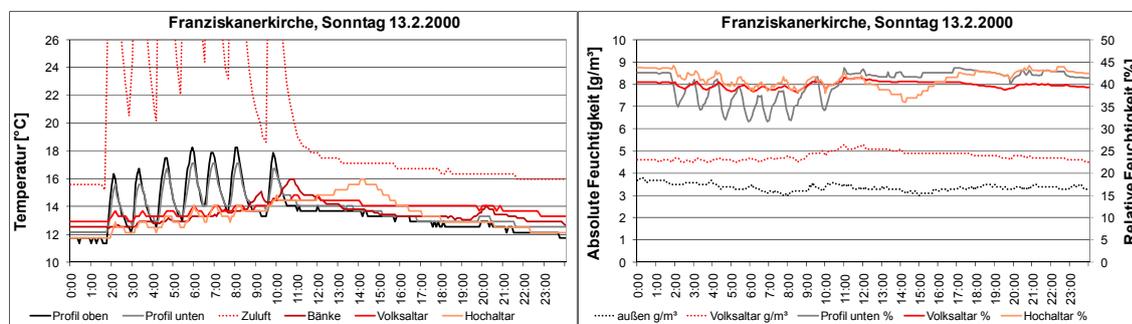


Abbildung 4.14: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf am Sonntag 13.2.2000. Gottesdienste um 7:00, 8:30, 10:00 und 19:30 Uhr - die Besucher sorgen für zusätzliche 1-2K Temperaturzunahme im Bankbereich.

4.5.2 Große Leistung und instationärer Betrieb

Viele Luftheizungen sind von ihrer Leistung her sehr großzügig ausgelegt, auch weil sie auf den instationären Betrieb dimensioniert sind. Allerdings haben die Raumklimamessungen gezeigt, dass die Temperatur im Aufenthaltsbereich oft erst mit dem Eintreffen der Kirchenbesucher - und deren Beitrag zur Heizleistung - nennenswert ansteigt. Sehr deutlich zeigt dies das Beispiel der Pfarrkirche von Sarnthein:

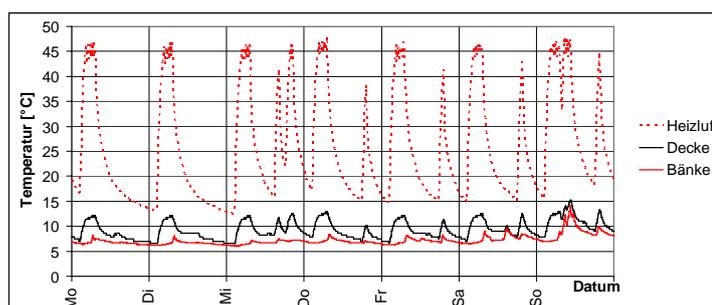


Abbildung 4.15: Typischer Temperaturverlauf der Zuluft, unter Decke und in den Bänken über einer Woche in der Pfarrkirche von Sarnthein

Der Aufenthaltsbereich wird erst bei Anwesenheit der Gläubigen nennenswert erwärmt, und das, obwohl durchschnittlich an beinahe 6 Stunden pro Tag, also während 25% der gesamten Zeit, geheizt wird. Unter der Decke ist es während der Heizperioden deutlich wärmer, ein großer Teil der Heizenergie sammelt sich also dort. Daraus zu schließen, das Heizen sei „umsonst“ und könne ganz weggelassen werden, wäre nicht richtig: Durch die wiederholten Heizimpulse wird verhindert, dass die Temperatur unter 6 - 8°C sinkt. Aber ein solcher „Grundheizungseffekt“ könnte bei durchgehender Heizung mit kleinerer Leistung erreicht werden, und das hätte Vorteile:

- Bei individueller Heizung:
 - kleinerer, und damit preisgünstigerer Heizkessel
 - weniger Aufheizverluste des Kessel durch weniger Stillstandsphasen
- Bei Anschluss an ein Fernwärmenetz:
 - günstigerer Wärmetauscher dank geringerer Leistung
 - niedrigere Leistungsgebühr
- Jedenfalls: gleichmäßigere Wärmeverteilung im Kirchenraum, wie die Ergebnisse der Raumklimamessung für stationäres Heizen gezeigt haben, und damit
 - größerer Nutzen der Heizung im Aufenthaltsbereich
 - weniger Schadensrisiko für Ausstattung in großer Höhe (Decke, Hochaltar), welche unter Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchtigkeit leidet
 - geringere Verluste über die Decke

4.5.3 Beschränkte Heizleistung bei Bankheizung

Bankheizungen werden in Südtirol praktisch immer instationär betrieben, [Arendt, 1993] und [Camuffo, 2007] bestätigen diese Beobachtung für Deutschland respektive Europa. Dennoch erscheint es den Pfarrgemeinden in besonderen Fällen sinnvoll, die Bankheizung über einen längeren Zeitraum zu aktivieren: So sollte z.B. die Pfarrkirche von St. Magdalena in Gsies (siehe Anhang C.1.18) für den Kindergottesdienst mit Blasiussegen am Nachmittag des 11. Februar möglichst warm sein.

Deshalb wurde an besagtem Tag schon um 11:30 Uhr begonnen zu heizen. Die Temperatur steigt zuerst relativ rasch (siehe Abbildung 4.16), dann immer langsamer an und nähert sich einem konstanten Wert, der für den Bankbereich bei etwa 7–8°C zu liegen scheint, für den Altarraum knapp über 5°C und unter der Decke zwischen 4°C und 5°C. Die Temperatur im Raum würde - bei der gegebenen Außentemperatur - auch bei konstantem Durchheizen nicht weiter ansteigen. Temperatur und Wärmezufuhr befinden sich im Gleichgewicht. Erst mit der zusätzlichen „Heizleistung“ der Gläubigen, die ab 16:00 Uhr ins Gotteshaus kommen, steigt die Temperatur im Altarbereich weiter auf 9–10°C an, im Altarraum und weiter oben im Raum auf 6–7°C.

Dass die Temperatur mit Eintreffen der Gläubigen stärker (sprich: steiler) zunimmt, kann man auch an einem gewöhnlichen Sonntag beobachten (Abbildung im Anhang C.42), wenn auch nicht so deutlich wie im oben beschriebenen Beispiel. Das ist nicht weiter verwunderlich, wenn man bedenkt, dass die Wärme, die ein Mensch im Sitzen abgibt, einer Heizleistung von etwa 100 W entspricht. Bei vollbesetzter Kirche entspräche dies mit 200 W je m Sitzbank in etwa noch einmal der installierten Leistung der Bankheizung. Dementsprechend ist im obigen Beispiel im Bankbereich die Temperaturzunahme um 2 K den Kirchenbesuchern zu verdanken, während die Bankheizung selbst zuvor für eine Temperaturzunahme um 5–6 K gesorgt hatte. Betrachtet man die Temperatur auf halber Höhe und unter der Decke stehen 2 K Temperaturanstieg durch die Kirchenbesucher sogar nur 2.5 K durch die Bankheizung gegenüber. Dies deutet darauf hin, dass der durch die Besucher verursachte Auftrieb warmer Luft größer ist als der heizungsbezogene.

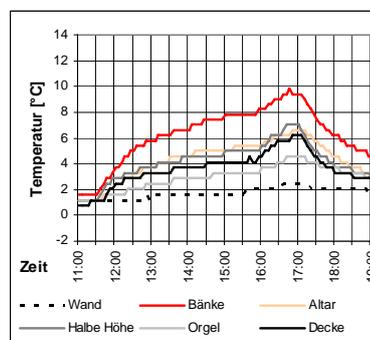


Abbildung 4.16: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von St. Magdalena in Gsies am 11.2.2000

4.5.4 Bankspiegel als Feuchtigkeitsquelle bei Bankheizung

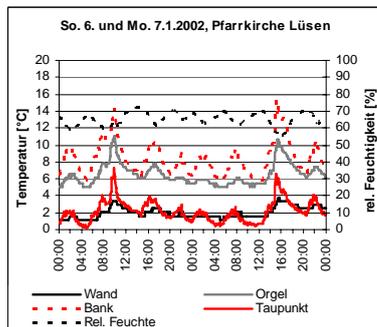


Abbildung 4.17: Typischer Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf in der Pfarrkirche von Lüssen

Die Pfarrkirche von Lüssen ist mit einer Bankheizung ausgestattet, welche in der Regel für die Gottesdienste aktiviert wird, und zudem eine Grundtemperatur in der Kirche hält. Die Kirche weist eine extrem starke Verschmutzung im Bereich der Decke auf (siehe Anhang C.1.12) - und nachdem die Pfarrgemeinde lange vergeblich nach der Feuchtigkeitsquelle gesucht hatte, gab die Raumklimamessung gerade während einer solchen Grundheizungsperiode den entscheidenden Hinweis:

Abbildung 4.17 zeigt, dass mit jedem Einschalten der Bankheizung (gut erkennbar am Temperaturanstieg im Bankbereich) die absolute Feuchtigkeit im Raum ansteigt, und zwar sowohl im Bereich der Bänke, als auch am Messpunkt bei der Orgel. Dies führt zu einem ständigen Schwanken um 5.5 g Wasserdampf pro m³ Luft mit Spitzen bis zu 8 g/m³ Luft. Der Taupunkt liegt damit praktisch ständig über der relativ kalten Oberflächentemperatur von etwa 2°C.

Während sich die große Zunahme relativer Feuchtigkeit während der Gottesdienste (Sonntag Vormittag und Montag Nachmittag) durch von den Personen eingebrachte Feuchtigkeit erklären lässt, weist während der Grundheizungsimpulse alles darauf hin, dass auch Feuchtigkeit aus dem Holz der Bänke und des Bankspiegels desorbiert wird: Durch die Heizung nimmt die Temperatur zu, die relative Feuchtigkeit im Bankbereich sinkt ab, und das Holz reagiert darauf mit Desorption. Der Wasserdampf verteilt sich, auch unterstützt durch die Thermik der warmen Luft, schnell im ganzen Raum - und gelangt damit auch zu den kalten Oberflächen, wo er mit großer Wahrscheinlichkeit kondensiert.

Nach Abschalten der Heizung sinkt die Temperatur im Bankbereich rasch wieder ab, die relative Feuchte steigt wieder an, und ein Teil der Feuchtigkeit wird vom Holz wieder absorbiert - worauf die schnellere Abnahme der absoluten Feuchtigkeit im Bankbereich als am Orgelmesspunkt hinweist. Die mehr oder weniger konstante relative Feuchtigkeit im Bereich der Orgel hingegen schließt deren Holzvolumen als wesentliche Feuchtigkeitsquelle eher aus.

Ob die Feuchtigkeit aus dem unter dem Bankspiegel liegenden Boden kommt oder, z.B., durch nasses Reinigen des Bankspiegels regelmäßig zugeführt wird, konnte noch nicht abschließend geklärt werden.

4.5.5 Oberflächen: Material und Kontakttemperatur

In der Pfarrkirche von St. Magdalena in Gsies, welche über eine elektrische Bankheizung verfügt, wurde im Altarraum eine elektrische Fußbodenheizung eingebaut: Auf 2 cm Styrodur wurde die Heizung (250 W/m^2) installiert, darauf 2 cm Porphyrlatten angebracht. Die Heizung wird zusammen mit der Bankheizung etwa zwei Stunden vor Gottesdienstbeginn aktiviert und funktioniert sehr zur Zufriedenheit des Pfarrers: Die Oberflächentemperatur beträgt etwa 15°C und wird von den Beteiligten (Priester, Ministranten, Lektoren) als angenehm empfunden.

Deshalb wurde auf der Orgelepore (einer Holzkonstruktion) auf Initiative des Pfarrers statt des Spannteppichs ein ähnliches System installiert: 200 W/m^2 , auf etwa 1 cm Gipsplatte, darüber Fliesen (Angaben Pfarrer Josef Leiter). Das Ergebnis ist hier nicht zufriedenstellend: Die Temperatur steigt nur auf etwa $7\text{-}8^\circ\text{C}^1$, und die Situation wird von den Nutzern (Kirchenchor) als schlechter als vorher bezeichnet.

Zwei Überlegungen hierzu sollen an dieser Stelle angestellt werden:

Erstens ergibt eine Abschätzung der U-Werte für beide Fälle, dass im Fall des Altarraums die 2 cm Styrodur und 10 cm darunterliegender Beton (ohne Berücksichtigung des Erdbodens) dafür sorgen, dass 87% der Heizleistung nach oben abgegeben werden. Da im Fall der Orgelepore der Wärmeleitwert nach oben durch die Fliese jenem durch den Porphyrlatten sehr ähnlich ist, der Wärmeleitwert nach unten aber deutlich größer als im Altarraum (etwa $2/3$ des Wärmeleitwerts nach oben), teilt sich die Heizleistung hier in einem ungünstigeren Verhältnis auf: Nur knappe 60% der Heizleistung dringen nach oben, entsprechend niedriger ist auch die sich einstellende Oberflächentemperatur.

Zweitens hängt die Unzufriedenheit der Nutzer auf der Orgelepore wohl auch damit zusammen, dass sich trotz objektiv höherer Temperatur im Vergleich zum nichtbeheizten Teppich die Fliese kälter anfühlt, wenn man mit der Hand hingreift: Die sogenannte Kontakttemperatur t_K , welche sich an der Berührungsfläche zwischen zwei unterschiedlich temperierten Körpern einstellt, hängt von den Wärmeeindringkoeffizienten b beider Stoffe ab. In anderen Worten: Je besser der

¹Die Temperaturangaben beziehen sich auf Lufttemperaturen im Kirchenraum von etwa -2 bis -3°C (zwischen den Heizzeiten).

Körper, den ich angreife, Wärme aufnimmt und ableitet, desto mehr Wärme gebe ich ab, und desto geringer ist die Hauttemperatur, die sich an der Berührungsstelle einstellt - und desto kälter fühlt sich der berührte Körper an.

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (4.7)$$

$$t_K = \frac{b_1 t_1 + b_2 t_2}{b_1 + b_2} \quad (4.8)$$

	Hand	Fliese	Teppich
λ [W/mK]		1.5	0.08
ρ [kg/m ³]		2200	800
c [J/kgK]		936	1440
b [Ws ^{0.50} /m ² K]	1100	1757	304
T [°C]	30	8	0
T_K [°C]		16.5	23.5

Tabelle 4.2: Für eine Handtemperatur von 30°C und einen Wärmeeindringkoeffizienten derselben von 1100 Ws^{0.50}/m² K ergibt sich für Fliesen auch bei höherer Temperatur T eine geringere Kontakttemperatur T_K als für einen objektiv kälteren Teppich.

4.5.6 Raumklima und Salzausblühungen

Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Europäischen Akademie Bozen und dem Institut für Petrographie der Universität Innsbruck konnten die in verschiedenen Kirchen gemessenen Raumklimadaten mit dem Auftreten von Salzausblühungen in Beziehung gesetzt werden [Troi u. a., 2002].

Ausblühsalze wie z.B. Natriumsulfat entwickeln ihre zerstörerische Wirkung vor allem in Hydratationsprozessen [Steiger u. Dannecker, 1998]. Die Hydratation von Thenardit zu Mirabilit hängt dabei sowohl von der Temperatur als auch von der relativen Feuchtigkeit ab, wie aus dem Phasendiagramm des Natriumsulfatsystems klar ersichtlich ist (in Abbildung 4.18 nach Steiger u. Dannecker [1998], modifiziert nach einem Vorschlag von Laue [2000]). Trägt man die Streubreite von Temperatur und relativer Feuchtigkeit in das Phasendiagramm ein, ist erkennbar, dass nicht für alle Kirchen eine Schädigung durch die Hydratation von Thenardit zu Mirabilit zu erwarten ist. In der Tat konnte in diesen Kirchen, z.B. in Prad, auch kein Mirabilit als bauschädigende Salzphase im Innenraum gefunden werden [Franzen, 2002].

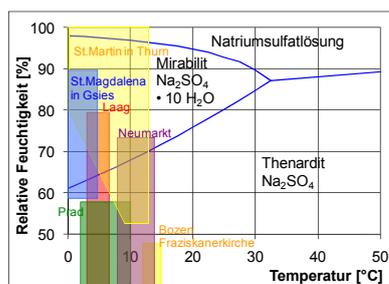


Abbildung 4.18: Streubreiten für verschiedene Kirchen im Na₂SO₄-H₂O-Phasendiagramm

Im Fall der Pfarrkirche von St. Martin in Thurn hingegen überstreicht der Streubereich nicht nur die Hydratationsgrenze von

Thenardid zu Mirabilit sondern reicht bis in den Auflösungsbereich zu wässriger Lösung. Tatsächlich konnten in St. Martin in Thurn gravierende Schäden durch Innenraumversalzung festgestellt werden [Franzen, 2002]. Da die Häufigkeit der Phasenwechsel für die Schadenswirksamkeit eine große Rolle spielt, wurden im 3-dimensionalen Diagramm die gemessenen Temperatur-Feuchtigkeitskombinationen über der Zeit aufgetragen (Abbildung 4.19). Die Phasengrenzlinien werden nun zu Phasengrenzflächen, und jeder Durchtritt der Messdatenlinie durch eine dieser Grenzflächen bedeutet einen potenziellen Phasenwechsel. Im betrachteten Zeitraum (Februar bis Mai 2000) liegt die Luftfeuchte meist im Stabilitätsbereich von Mirabilit, überschreitet aber sehr häufig sowohl die Grenze zur wässrigen Lösung (vor allem in der Anfangsphase) als auch jene zum Thenardid (in der Endphase der Messperiode).

Die Daten stimmen also mit den beobachteten Schadensphänomenen sehr gut überein. Gleichzeitig wird aus obiger Überlegung klar, dass das weitere Schädigungsausmaß durch ein festgestelltes Ausblühungssalz mit einer entsprechenden Beeinflussung von Temperatur und Feuchtigkeit eingedämmt werden kann.

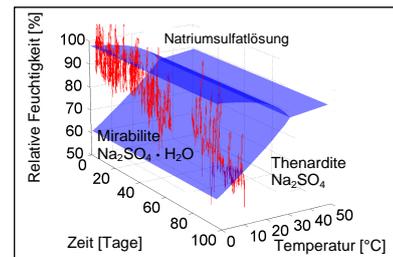


Abbildung 4.19: Streubreiten für verschiedene Kirchen im $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ -Phasendiagramm

5. Numerische Simulation

Die Methode der Computational Fluid Dynamics, kurz CFD, gründet auf der numerischen Lösung der partiellen Differentialgleichungen, die ein Strömungsgebiet exakt beschreiben. So können Druck- und Temperaturverteilung sowie Luftströmungen auch für komplexe Geometrien berechnet werden.

Während CFD im Bereich der Luft- und Raumfahrt, der Automobilentwicklung sowie der Turbinenauslegung schon lange nicht mehr wegzudenken ist, findet die Methode erst in den letzten Jahren auch im Gebäudebereich vermehrt Anwendung: Mit steigenden Rechnerkapazitäten wird sie für die großen Volumina im Bausektor attraktiv und öffnet vielfältige Nutzungsmöglichkeiten von wärmetechnischen Studien und Auslegungen über Behaglichkeitsuntersuchungen bis zum Brandschutz [Haupt, 2001].

In dieser Arbeit dient CFD dem Vergleich unterschiedlicher Heizungssysteme bei sonst gleichen Randbedingungen sowie der Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter (des Heizungssystems und der Gebäudehülle) auf das Raumklima - und ergänzt so die Raumklimamessung, wo jeweils auch Architektur, Außenklima und Nutzung mit eine Rolle spielen.

Die Ergebnisse einer Simulation mit CFD können sehr gut graphisch dargestellt werden. Das ist für den Experten nützlich, da es die Analyse erleichtert, aber auch in der Kommunikation mit Laien hilfreich, wenn es darum geht aufzuzeigen, wo zum Beispiel Luftströmungen zu erwarten sind oder welche Wandbereiche kondensationsgefährdet sind.

Das Fallbeispiel der Pfarrkirche von Branzoll (Südtirol/Italien) zeigt, dass CFD bei überlegtem Gebrauch von Näherungen auch heute schon mit vertretbarem Aufwand einen wichtigen Beitrag bei der Planung einer Kirchenheizung leisten kann.

Gerade im Bereich der Denkmalpflege, wo kaum Standardlösungen zur Anwendung kommen können und wenig Erfahrungswerte vorliegen, ist der zusätzliche Aufwand für den Einsatz von CFD in der Planungsphase gerechtfertigt; nicht zuletzt deshalb, weil ein Fehler hier nicht nur finanzielle Folgen hat, sondern nicht selten mit dem Verlust nicht wiederherstellbarer historischer Substanz verbunden ist.

5.1 Methode

In dieser Arbeit kam für die Simulation FLUENT 5.3 [Fluent, 2000] zum Einsatz. Diese kommerzielle Software ist schon seit vielen Jahren am Markt etabliert und wird in den letzten Jahren auch vermehrt im Bereich der Gebäudesimulation eingesetzt. Haupt [2001] setzt in seiner Untersuchung zur Simulation auftriebsinduzierter Innenraumströmung dieses Programm ein, ebenso verwenden es - speziell für Kirchen - Schellen [2002] zur Bestimmung der Raumströmungen und Limpens-Neilen [2006] zur Untersuchung von Bankheizungen.

FLUENT 5 kann mit unstrukturierten Gitternetzten rechnen, was bei komplexen Geometrien von großem Vorteil ist. Außerdem bietet es unterschiedliche Modelle für Turbulenz, Strömung in Wandnähe und Strahlung an und kann gegebenenfalls auch die Feuchtigkeit der Luft als eigene Phase mitrechnen, was in dieser Arbeit jedoch nicht genutzt wurde. Tabelle 5.1 zeigt im Überblick, welche Eingangsinformationen dem Programm in dieser Arbeit gegeben und welche Ausgabemöglichkeiten genutzt wurden.

Die Genauigkeit der Methode hängt von der Qualität des physikalischen Modells, der Feinheit der Diskretisierung und der Iterationsgenauigkeit ab. In den folgenden Abschnitten werden die Eingabe- und Ausgabeoptionen im Detail ausgeführt.

5.1.1 Gebäude und Gitternetz

Für den Vergleich der unterschiedlichen Heizungssysteme in Abschnitt 5.3 wurden typische Dimensionen einer kleinen Südtiroler Dorfkirche mit Tonnengewölbe herangezogen: 20 m Gesamtlänge, 14 m davon das Kirchenschiff, 6 m der Altarraum; das Kirchenschiff mit 8 m etwas breiter als der Altarraum; 10 m lichte Höhe im Kirchenschiff, 9 m im Altarraum. Daraus ergibt sich eine Bodenfläche von 148 m², ein Volumen von 1'325 m³, eine Wandfläche von 386 m² und eine Gewölbefläche von 232 m². Hinten im Kirchenschiff befindet sich auf 3 m Höhe eine 3 m tiefe Orgelempore, die sechs Fenster haben je eine Breite von 2 m und eine Höhe von 3 m und befinden sich 3 m über dem Boden.

Da die notwendige Feinheit der Diskretisierung in Kirchen sehr schnell zu einer sehr großen Zahl von Zellen führt, wurden die zu erwartenden Symmetrien genutzt:

- für die Simulation der Luftheizung die Längsachse, es wurde also die halbe Kirche (im Folgenden Kirchenhälfte KH

Eingabe	3D Gebäudegeometrie und Gitternetz Heizungsvarianten Modelle für Energie, Turbulenz, Strahlung, Gravitation Materialeigenschaften Randbedingungen: Lufteinlässe und -auslässe, Wände, Symmetrieebenen, Periodizität
numerische Lösung	Lösungsprinzip: nicht gekoppelt (segregated) Diskretisierung: 1. Ordnung zum Anrechnen, dann Übergang auf Diskretisierung 2. Ordnung Druck-Geschwindigkeits-Korrekturverfahren: SIMPLE für stationäre Berechnung Konvergenzkriterien: Residuen und Wärmestrombilanz
Ausgabe	Luftgeschwindigkeit, Temperatur, aus dieser berechnete relative Feuchtigkeit in: <ul style="list-style-type: none"> • Konturplots auf Oberflächen sowie Längs- und Querschnitten • Geschwindigkeitsvektorfeldern • Stromfadendarstellungen • Mittelwerten über Teilflächen • Wärmeströmen über Modellgrenzen und Teilflächen

Tabelle 5.1: Überblick über die Eingangsinformationen, Berechnungsparameter und genutzten Ausgabemöglichkeiten

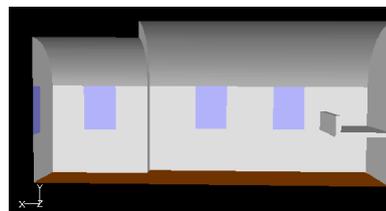


Abbildung 5.1: Typische Geometrie einer kleinen Südtiroler Dorfkirche

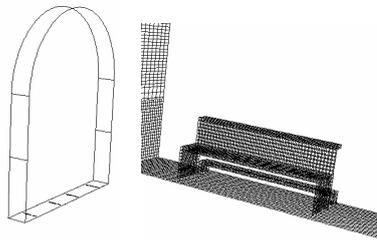


Abbildung 5.2: Geometrie und Gitternetz einer „Kirchenscheibe“

genannt) simuliert;

- für die Simulation der Fußbodenheizung und Bankheizung zudem der Querschnitt auf halber Länge, es wurde also ein hinteres Viertel der Kirche (im Folgenden Kirchenviertel KV genannt) simuliert;
- für die Simulation des Aufenthaltsbereiches wurde die Scheibe zwischen zwei Querschnitten (im Folgenden Kirchenscheibe KS genannt) simuliert.

Der Vergleich der Simulation der Fußbodenheizung sowohl für die Kirchenhälfte als auch für das Kirchenviertel zeigt, dass die Simulation nur des hinteren Teils der Kirche zwar klar ein falsches Bild der sich einstellenden Luftströmung ergibt, die für die Bewertung wichtigen Verteilungen der Temperaturen im Raum und an den Oberflächen sowie der Luftgeschwindigkeit in Oberflächennähe bei der flächig eingebrachten Wärme aber genügend genau ermittelt werden - und das in weniger als der halben Rechenzeit.

Interessierten nicht so sehr der gesamte Strömungsverlauf, die Temperaturen und Geschwindigkeiten an den Oberflächen, sondern im Besonderen die Raumklimaverhältnisse im Aufenthaltsbereich, war es sinnvoll, die Geometrie weiter zu zerlegen: Auch hier, bei der Simulation der Kirchenscheibe, zeigt der Vergleich der Oberflächentemperaturen, dass die Temperaturverteilung genügend ähnlich ist. In der Kirchenscheibe wurden auch die Bänke mit simuliert, so dass die sich im Aufenthaltsbereich einstellenden Temperaturen und Geschwindigkeiten beobachtet werden konnten.

Diese Geometrien wurden mit Hilfe des von FLUENT mitgelieferten Programmes GAMBIT 1.2 erzeugt und anschließend vernetzt. Zur Vernetzung stellt GAMBIT verschiedene Methoden zur Verfügung; in dieser Arbeit wurde ein Hexaedergitter erzeugt, indem zuerst die Flächen mit Vierecken vernetzt wurden, und aus diesen dann das 3D-Gitter erstellt wurde. Für das Konvergieren und die Qualität der Lösung ist die Gittertopologie von großer Bedeutung: neben der Größe der Gitterzellen und der möglichst stetigen Größenänderung bei Verfeinerungen (z.B. in Wandnähe) ist vor allem die „skewness“, also die Verzerrung der Gitterzellen, ein Kriterium für die Gittergüte. GAMBIT stellt entsprechende Kennwerte zur Überprüfung der Gitterqualität zur Verfügung. Auch in FLUENT selbst kann das Gitter noch verfeinert werden, wenn gewünscht in Abhängigkeit von der Lösung (z.B. dem Temperaturgradienten).

Das Gitter wurde so lange verfeinert, bis die Lösung sich nicht mehr nennenswert änderte. Die Änderung wurde dabei zum einen qualitativ anhand der Temperaturen und Geschwindigkeiten auf Schnitten und Oberflächen, zum anderen analytisch anhand der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung auf den Oberflächen beurteilt.

5.1.2 Heizung

Simuliert wurden Luftheizung, Fußbodenheizung und Bankheizung in den in Tabelle 5.2 dargelegten Varianten.

Variante	Heizungssystem	Beschreibung
Kirchenhälfte		
KH-LH-A	Luftheizung	Zuluft vorn, Abluft hinten, Auslass 0.5m ² , 21°C, 1m/s
KH-LH-B	Luftheizung	Zuluft vorn und Mitte, Abluft hinten, Auslässe je 1m ² , 21°C, 0.25m/s
KH-LH-C	Luftheizung	Zuluft in der Mitte, Abluft hinten, Auslass 2m ² , 21°C, 0.25m/s
KH-LH-D	Luftheizung	Zuluft vorn, Abluft hinten, Auslass 0.16m ² , 45°C, 1m/s
KH-LH-E	Luftheizung	Zuluft rundum, Abluft im Mittelgang, Auslass 5.36m ² , 20°C, 0.1m/s
KH-FH-A	Fußbodenheizung	100W/m ²
KH-FH-B	Fußbodenheizung	118W/m ²
Kirchenviertel		
KV-FH-A	Fußbodenheizung	100W/m ²
KV-FH-B	Fußbodenheizung	100W/m ² und Isolierverglasung
KV-FH-C	Fußbodenheizung	100W/m ² und isolierte Decke
KV-FH-D	Fußbodenheizung	100W/m ² und Treppenöffnung zur Orgelempore
KV-BH-A	Bankheizung	200W/m
Kirchenscheibe		
KS-LH	Luftheizung	Zuluft rundum, Abluft im Mittelgang, Auslass 0.4m ² , 20°C, 0.1m/s
KS-FH	Fußbodenheizung	100W/m ²
KS-BH	Bankheizung	200W/m

Tabelle 5.2: Simulierte Varianten für Luftheizung (LH), Fußbodenheizung (FH) und Bankheizung (BH) in Kirchenhälfte (KH), Kirchenviertel (KV) bzw. Kirchenscheibe (KS)

5.1.3 Physikalische Modelle

Die Bestimmungsgleichungen für eine reibungsbehaftete Strömung, die sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen, sind ein gekoppeltes System aus nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen, das auf den Grundsätzen der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung basiert. Die Gleichungen für Impuls- und Massenerhaltung werden in FLUENT auf jeden Fall gelöst. Sollen auch Wärmeströme und -übergänge modelliert werden, wie in dieser Arbeit, wird die Energiegleichung mitgelöst.

Auftrieb und natürliche Konvektion spielen bei der sich einstellenden Luftströmung in beheizten Kirchen eine wichtige Rolle, wie das Verhältnis aus Grashofzahl zum Quadrat der Reynoldszahl zeigt: Ist dieses deutlich größer als 1, kann von freier Konvektion ausgegangen werden (Abbildung 5.4). Ein wichtiger Kennwert für Auftriebsströmungen ist auch die Ra-

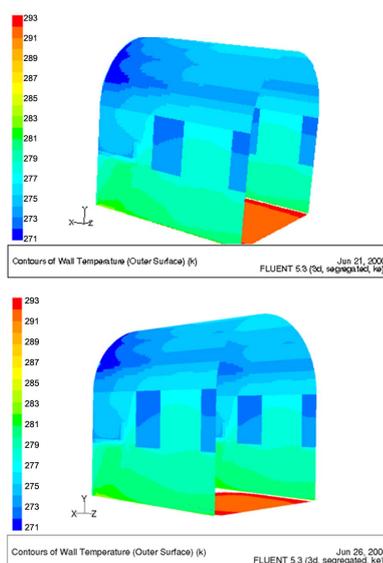


Abbildung 5.3: Die Oberflächentemperaturen ändern sich beim Übergang vom Gitternetz mit 360.000 Zellen (oben) auf 550.000 Zellen (unten) nur mehr unwesentlich

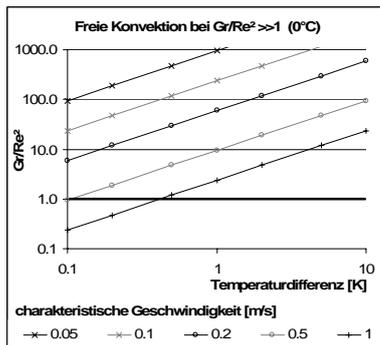


Abbildung 5.4: Das Verhältnis aus Grashofzahl zum Quadrat der Reynoldszahl ist, abgesehen von großen Geschwindigkeiten (>1m/s) bei gleichzeitig kleiner Temperaturdifferenz (<0.5K), so groß, dass von einer freien Konvektion ausgegangen werden kann

leighzahl: Der Übergang von laminarer zu turbulenter Auftriebsströmung liegt im Bereich $10^8 < Ra < 10^{10}$, oberhalb ist mit turbulentem, unterhalb mit laminarem Verhalten zu rechnen. Für die in dieser Arbeit relevanten Eckgrößen (die in der Legende zu den Formeln in Klammer angegeben sind), liegt die Raleighzahl zwischen 10^{11} und 10^{13} .

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (5.1)$$

$$Re = \frac{u L}{\nu} \quad (5.2)$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu a} \quad (5.3)$$

g = Erdbeschleunigung [m/s^2] (9.81)

β = Raumausdehnungskoeffizient [$1/K$] (0.00367)

ΔT = Temperaturdifferenz [K] (0.1-10, s.Abbildung)

L = charakteristische Länge [m] (10m)

ν = kinematische Viskosität [m^2/s] ($1.3 \cdot 10^{-5}$ bei $0^\circ C$)

u = charakteristische Geschwindigkeit [m/s] (0.05-1 m/s)

a = Temperaturleitkoeff. = $\lambda/(\rho c_p)$ [m^2/s] ($1.88 \cdot 10^{-5}$ bei $0^\circ C$)

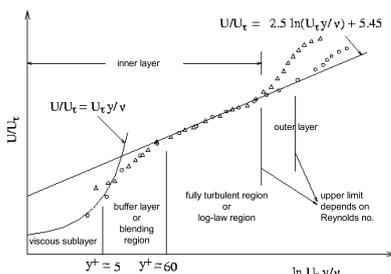


Abbildung 5.5: Im wandnahen Bereich wird die Strömung in drei Schichten unterteilt [Fluent, 2000]

Für die Berücksichtigung des Auftriebs wurde der Boussinesq-Ansatz gewählt, der die Dichte des Fluids (in diesem Fall der Luft) in allen Gleichungen als konstanten Wert behandelt, abgesehen vom Auftriebsterm in der Impulsgleichung. Das Boussinesq-Modell wird von Fluent [1999] speziell für die Rechnung von natürlicher Konvektion in geschlossenen Räumen empfohlen und wurde von Haupt [2001] als geeignet validiert.

Die Turbulenz wurde mit Standard k- ϵ -Modell und Standard-Wandfunktion modelliert. Das heißt, für die Modellierung der Turbulenzen werden zwei weitere Gleichungen gelöst: für die kinetische Intensität k und für die kinetische Dissipationsrate ϵ . Im wandnahen Bereich, der wie in Abbildung 5.5 dargestellt aus einer schmalen viskosen Schicht, eine Übergangszone, und der darauffolgenden Schicht mit vollausgebildeter Turbulenz besteht, bildet die semi-empirische Standard-Wandfunktion die innersten beiden Schichten nach; das heißt, die erste Zelle des Gitters sollte innerhalb der „log-law region“ liegen. Kennwert hierfür ist der dimensionslose Wandabstand y^+ , welcher zwischen 30 und 60 liegen sollte.

$$y^+ = \rho \cdot u_\tau \cdot \nu \quad (5.4)$$

ρ = Dichte [kg/m^3]

ν = kinematische Viskosität [m^2/s]

u_τ = Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s] = $\sqrt{\tau_w / \rho}$

τ_w = Wandschubspannung [N/m^2]

Die Erfahrung von Limpens-Neilen [2006], dass das Standard k - ϵ -Modell im Fall der Modellierung eines Raumes mit Bankheizung bessere Ergebnisse lieferte als das RNG k - ϵ -Modell bestätigt die Wahl des Modells für diese Arbeit.

Zur Modellierung der Strahlung wurde das Discrete-Ordinate-Modell verwendet, bei dem für jede Richtung (Anzahl wählbar, im konkreten Fall Standardeinstellung von 2×2 je Oktant, also insgesamt 32) eine zusätzliche Gleichung für die Strahlungsterme gelöst wird. Diese Vorgangsweise ermöglicht das Rechnen mit Materialien geringer optischer Dichte (Luft) und die Berücksichtigung von Strahlungsaustausch zwischen Wänden, Abstrahlungskoeffizienten der Wand, Absorption und Streuung, semitransparenten Materialien sowie lokalen Quellen. In seiner Arbeit zur Simulation von Auftriebsströmungen zeigt Haupt [2001], dass dieses Modell den Wärmestrom von einer Oberfläche zum Medium Luft wesentlich besser trifft als das verbreitete P1-Modell, welches generell zu hohe Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung errechnet.

5.1.4 Materialien

Die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien sind in Tabelle 5.3 wiedergegeben. Für Luft, Dolomit und Holz (Eiche, Buche) wurde auf die Fluent-eigene Materialdatenbank zurückgegriffen [Fluent, 2000], die Werte für Glas stammen aus Frey u. a. [1994]. Da für die Luftdichte der Boussinesq-Ansatz gewählt wurde, ist die Angabe des Raumausdehnungskoeffizienten nötig.

Material	ρ kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kgK	η kg/ms	β 1/K
Luft	1.247	0.0242	1006	$1.78 \cdot 10^{-5}$	0.00367
Dolomit	2870	1.75	910		
Holz	700	0.17	2310		
Glas	2500	0.80	790		

Tabelle 5.3: Physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien; Dichte ρ , Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität c , sowie für die Luft die dynamische Viskosität η (bei 283 K) und der Raumausdehnungskoeffizient β

5.1.5 Randbedingungen

Zur Lösung der Differentialgleichungen müssen geeignete Randbedingungen vorgegeben werden. In der konkreten Arbeit waren dies neben den Wandrandbedingungen vor allem die oben schon erwähnten Symmetrieebenen. Die Wände wurden im Großteil der Fälle rein über die Wandrandbedingung formuliert, d.h. die Dicke der Wand wird in der Randbedingung berücksichtigt, die Temperaturverteilung in der Wand selbst wird nicht berechnet. In einigen Fällen (Pfarrkirche Branzoll, sie-

he Abschnitt 5.4) wurde die Wand hingegen mit simuliert, als äußere Randbedingung diente in diesem Fall die Außentemperatur.

Für die Simulation der Luftheizungsvarianten wurden am Lufteinlass Geschwindigkeit und Temperatur definiert (velocity inlet), am Luftauslass der Druck (pressure outlet). Bei den Flächenheizungen wurden den jeweiligen Flächen entsprechende Wärmeströme aufgeprägt.

5.1.6 Numerische Lösung

Für die numerische Lösung wurde der nicht gekoppelte (segregated) Lösungsalgorithmus eingesetzt, bei welchem jeweils zunächst die Impulsgleichung und in den darauffolgenden Schritten die Kontinuitätsgleichung (auch Druck-Korrekturgleichung), die Energiegleichung sowie die Bestimmungsgleichungen für die Turbulenz und andere skalare Größen gelöst werden. Gegenüber der gekoppelten Lösung, wie sie im Überschallbereich ausschließlich verwendet wird, hat dieses Verfahren den Vorteil, numerisch weniger aufwendig zu sein und weniger Rechnerressourcen zu benötigen.

Angerechnet wurde jeweils mit dem numerisch stabileren Diskretisierungsschema 1. Ordnung, um dann bei hinreichender Konvergenz auf Diskretisierung 2. Ordnung überzugehen. Für die Druckdiskretisierung wurde PRESTO! eingesetzt, wie von Fluent [1999] und Haupt [2001] für Auftriebsströmungen empfohlen. Die Druck-Geschwindigkeitskopplung wurde nach dem auf [Patankar u. Spalding, 1972] basierenden SIMPLE-Algorithmus berücksichtigt.

Die Beurteilung der Konvergenz erfolgte anhand der Residuen und der Wärmestrombilanz.

5.1.7 Auswertung der Simulationsergebnisse

Fluent bietet für die Auswertung der Simulationsergebnisse eine Vielzahl von Werkzeugen an: Diese reichen von Histogrammen und x-y-Diagrammen über 2- und 3-dimensionale Konturplots, Geschwindigkeitsvektorfelder und Stromfadendarstellungen bis zur Erzeugung von Filmsequenzen. Außerdem können über alle Modellgrenzen sowie beliebig definierbare Flächen Massen und Energieflüsse sowie Integrale und (gewichtete) Mittelwerte aller verfügbaren Größen berechnet werden. Darstellbare Größen sind Geschwindigkeit, Temperatur und Druck, aber auch Turbulenz, Stoffeigenschaften, Gitterparameter und viele andere mehr. Auch die Darstellung nut-

zerdefinierter Größen (custom field functions), die mit Hilfe üblicher mathematischer Operationen aus den Zellenwerten berechnet werden, ist möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit leisteten insbesondere die Berechnung von Wärmeströmen, sowie die Mittelung von Temperaturen und Geschwindigkeiten über definierte Flächen wertvolle Dienste bei der Beurteilung der Simulationsergebnisse, ebenso wie die Möglichkeit der Definition von eigenen Größen (custom field functions, siehe Abschnitt 5.1.8).

Zu den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten graphischen Auswertungsmethoden zählen

- Vektorgraphiken zur Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung an Oberflächen und in Schnittebenen
 Die Pfeile zeigen die Richtung der Strömung an. Die Geschwindigkeit wird über die Länge des Pfeils ausgedrückt oder über dessen Farbe, falls letztere nicht zur Darstellung der Temperatur oder einer anderen Variablen genutzt wird.
- Contour plots zur Darstellung der Temperatur an Oberflächen und in Schnittebenen
- Stromfadendarstellungen zur Darstellung des Strömungsverlaufs

5.1.8 Berücksichtigung der Feuchtigkeit

Die Feuchtigkeit im Raum wurde nicht simuliert, sondern erst zum Zeitpunkt der Auswertung berücksichtigt: für (i) die Bewertung des Kondensationsrisikos an Oberflächen sowie (ii) die Bestimmung von Zonen geringer relativer Feuchte.

Es wurde eine im Raum gleichmäßig verteilte absolute Feuchtigkeit (in g/m^3) angenommen und über die von FLUENT bereit gestellte Möglichkeit der custom field function aus dieser und der aus den Temperaturwerten der einzelnen Zellen ermittelten absoluten Sättigungsfeuchtigkeit nach den folgenden Gleichungen die relative Feuchtigkeit berechnet.

$$a_{\text{sat}} = \frac{6.11 \cdot 10^{\frac{7.5-t}{237.4+t}}}{0.0046158 \cdot \vartheta} \quad (5.5)$$

$$a_{\text{sat,surf}} = \frac{6.11 \cdot 10^{\frac{7.5-t_{\text{surf}}}{237.4+t}}}{0.0046158 \cdot \vartheta_{\text{surf}}} \quad (5.6)$$

$$\varphi_a = \frac{a}{a_{\text{sat}}} \quad (5.7)$$

$$\varphi_{a,\text{surf}} = \frac{a}{a_{\text{sat,surf}}} \quad (5.8)$$

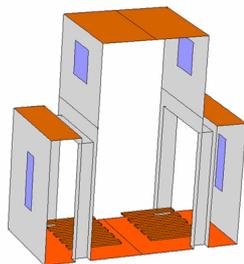


Abbildung 5.6: Geometrisches Modell der Kirche: Um die Simulation zu beschleunigen, wurde eine 6 m lange Scheibe des Kirchenschiffes simuliert

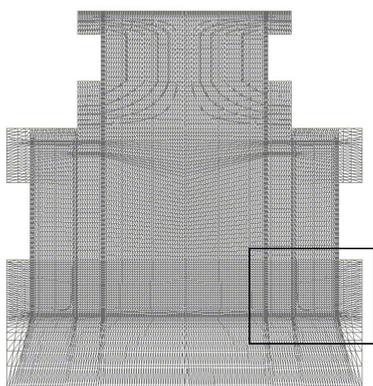


Abbildung 5.7: Querschnitt durch das Gitter des Kirchenmodells, mit Detailansicht des in Wandnähe verfeinerten Gitter

a = absolute Feuchtigkeit [g/m^3] t, t_{surf} = (Oberflächen-) Temperatur in [$^{\circ}\text{C}$]

$\vartheta, \vartheta_{surf}$ = (Oberflächen-) Temperatur in [K]

$\varphi_a, \varphi_{a,surf}$ = relative Feuchtigkeit (an der Oberfläche) bei absoluter Feuchtigkeit a

5.1.9 Randbedingungen und verwendete Modelle für das Fallbeispiel (Pfarrkirche von Branzoll)

Da eine instationäre Simulation der im konkreten Fall zu bewertenden gesamten Pfarrkirche von Branzoll (siehe Abschnitt 5.4) die technischen Möglichkeiten des eingesetzten PCs sowie die zeitlichen Grenzen des Projektes gesprengt hätte, wurde eine 6 m lange Scheibe des Kirchenschiffes (siehe Abbildung 5.6) stationär simuliert. Das entspräche den Verhältnissen in einer unendlich langen, durchgehend beheizten Kirche. Der tatsächliche Heizungsbedarf wird unterschätzt (da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen deutlich kleiner ist) und jedwede Längsströmung vernachlässigt. Diese Abweichungen von der Realität müssen bei der Interpretation der Ergebnisse natürlich entsprechend berücksichtigt werden.

Das Gitter des Modells wurde in Oberflächennähe verfeinert, wo sowohl Geschwindigkeits- als auch Temperaturgradienten erwartungsgemäß am größten sind. Insgesamt bestand das Gitter aus 840'000 Hexaeder-Zellen.

Zur Anwendung kamen die folgenden physikalischen Modelle:

- Auftriebsmodell: Boussinesq-Ansatz
- Turbulenzmodell: Standard $k-\epsilon$ mit Standard-Wandfunktion
- Strahlungsmodell: „Discrete Ordinate“ mit 2x2 Richtungen je Oktanten

Die Beurteilung der Konvergenz erfolgte anhand von Residuen und Wärmestrombilanz.

Die physikalischen Eigenschaften der Materialien der einzelnen Bauteile sind in Tabelle 5.4 wiedergegeben. Die Außentemperatur wurde auf -10°C gesetzt, der Wärmeübergang zwischen Außenluft und Wand erfolgt nur über Konvektion. Für die Fußbodenheizung wurde die gesamte Bodenfläche als Randbedingung mit einem konstanten Wärmestrom belegt, bei der Bankheizung wurde als Näherung der realen Situation die Unterfläche der Bank mit einem entsprechenden Wärmestrom belegt.

Bauteil	Dicke m	Material	Dichte ρ kg/m ³	Wärmeleit- fähigkeit λ W/mK-	spez. Wärme- kapazität c kJ/kgK
Wand	1	Stein	2870	1.75	910
Decke	0.5	Holz	700	0.17	2310
Fenster	0.01	Glas	2500	0.80	790
Boden	3	Stein	2870	1.75	910
Bank		Holz	700	0.17	2310

Tabelle 5.4: Bauteile mit Angabe der entsprechenden Dicke und den wichtigsten physikalischen Eigenschaften der Materialien

Es wurden Fußbodenheizung (FH) und Bankheizung (BH) in mehreren Varianten berechnet (Tabelle 5.5). Vor allem für das System „Bankheizung“ wäre eine instationäre Rechnung sehr interessant gewesen, da es aus Kostengründen nicht realistisch ist, eine Kirche stationär mit (elektrischer) Bankheizung zu beheizen. Der Zeitaufwand für diese Simulation war jedoch zu groß. Der Unterschied zwischen den Varianten FH und BH besteht nun also vor allem darin, dass bei der Fußbodenheizung die Wärmeabgabe über eine größere Fläche und mit größerem Strahlungsanteil erfolgt. Auch die Luftheizung, wie sie momentan besteht, oder in einer anderen Variante, hätte die Modellierung der gesamten Kirche vorausgesetzt, und war deshalb bei der derzeitigen Stand der Rechnerleistung nicht machbar.

Variante	Heizungssystem	Heizleistung	Bemerkungen
FH-A	Fußbodenheizung	80 W/m ²	6240 W
FH-B	Fußbodenheizung	80 W/m ²	160 W/m ² in Wandnähe
FH-C	Fußbodenheizung	100 W/m ²	7800 W
BH-A	Bankheizung	200 W/m	7000 W
BH-B	Bankheizung	400 W/m	14000 W

Tabelle 5.5: Simulierte Heizungsvarianten für die Pfarrkirche in Branzoll

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Übersicht: Temperaturen und Geschwindigkeiten

Die Tabellen 5.6 und 5.7 stellen für die simulierten Varianten aus Tabelle 5.4 die Temperaturen und Geschwindigkeiten sowie die Wärmeströme im Falle der Kirchenviertel, gemittelt bzw. integriert über die jeweilige Fläche dar.

	KH-LH-A	KH-LH-B	KH-LH-C	KH-LH-D	KH-LH-E	KH-FH-A	KH-FH-B
ϑ -Luft	283.45	283.42	283.37	283.58	284.96	280.12	.
ϑ -Personen	282.08	282.36	282.47	281.71	285.1	280.3	.
ϑ -Boden	277.98	278.44	278.26	275.97	282.18	292.44	.
ϑ -Decke	276.27	276.11	275.96	276.4	277.23	275.33	.
ϑ -Fenster	273.96	274.06	274.09	273.85	275.2	273.82	.
ϑ -Wand	277.42	277.64	277.53	277.33	279.85	278.37	.
V-Luft	0.1733	0.2053	0.2051	0.1667	0.2136	0.1572	.
V-Personen	0.0414	0.076	0.0964	0.0498	0.1986	0.1416	.
V-Boden	0.1822	0.2182	0.205	0.1783	0.2311	0.0209	.
V-Decke	0.3249	0.3356	0.3052	0.3146	0.3065	0.2216	.
V-Fenster	0.294	0.3553	0.2857	0.28225	0.2864	0.235	.
V-Wand	0.2614	0.2808	0.2618	0.2504	0.2813	0.2026	.

Tabelle 5.6: Mittlere Temperaturen und Geschwindigkeiten in den simulierten Varianten der „Kirchenhälfte“

	KV-FH-A	KV-FH-B	KV-FH-C	KV-FH-D	KV-BH-A	KS-LH	KS-FH	KS-BH
ϑ -Luft	281.1	281.8	282.0	280.9	.	285.6	281.2	281.2
ϑ -Personen	281.8	282.4	282.3	281.2	.	283.0	284.6	290.4
ϑ -Boden	292.7	293.8	289.8	292.5	.	281.2	296.5	285.3
ϑ -Decke	276.1	276.5	279.9	276.3	.	278.4	276.7	275.2
ϑ -Fenster	275.1	277.3	275.4	275.0	.	283.1	274.5	273.6
ϑ -Wand	279.3	279.8	279.7	279.2	.	282.3	279.9	277.7
ϑ -Bankheizung								341
V-Luft	0.041	0.044	0.041	0.087	.	0.091	0.015	0.054
V-Personen	0.029	0.029	0.028	0.094	.	0.070	0.045	0.112
V-Boden	0.071	0.074	0.064	0.237	.	0.034	0.067	0.161
V-Decke	0.090	0.097	0.070	0.117	.	0.082	0.056	0.125
V-Fenster	0.106	0.098	0.120	0.080	.	0.249	0.115	0.291
V-Wand	0.103	0.120	0.110	0.181	.	0.327	0.073	0.326
V-Bankheizung								0.083
Q-Fenster	-567	-376	-519					
Q-Fenster	-281	-221	-306					
Q-Wand	-1777	-1828	-1817					
Q-Wand	-1266	-1298	-1300					
Q-Decke	-1674	-1726	-202					
Q-Decke	-636	-676	122					

Tabelle 5.7: Mittlere Temperaturen und Geschwindigkeiten in den simulierten Varianten der „Kirchenviertel“ und „Kirchenscheiben“

5.2.2 Geschwindigkeit und Temperatur im Längsschnitt (KH)

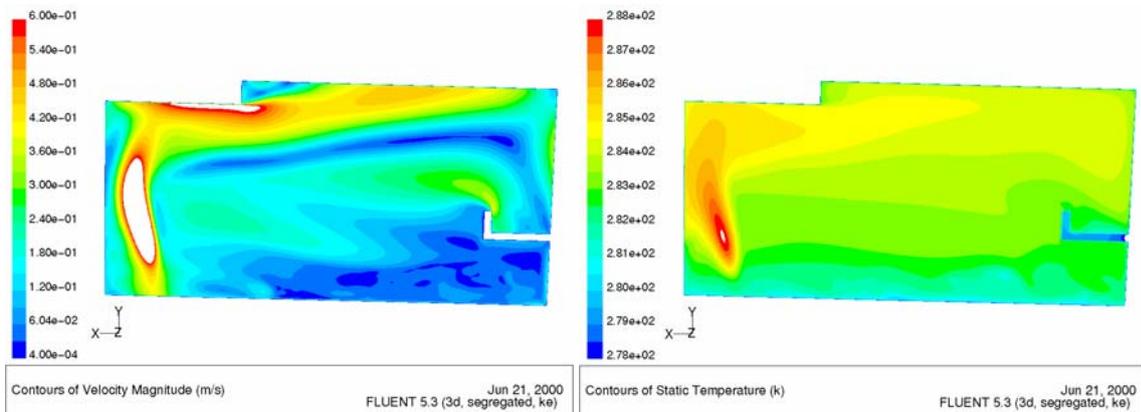


Abbildung 5.8: KH-LH-A, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

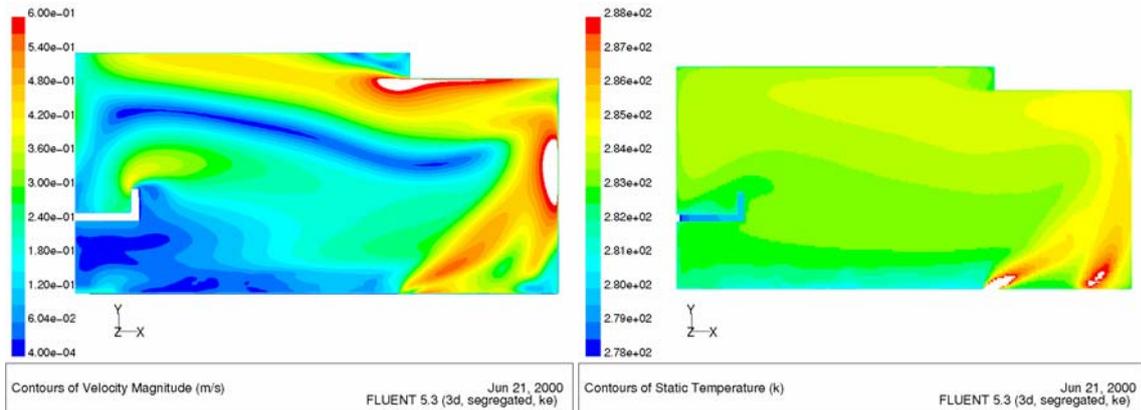


Abbildung 5.9: KH-LH-B, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

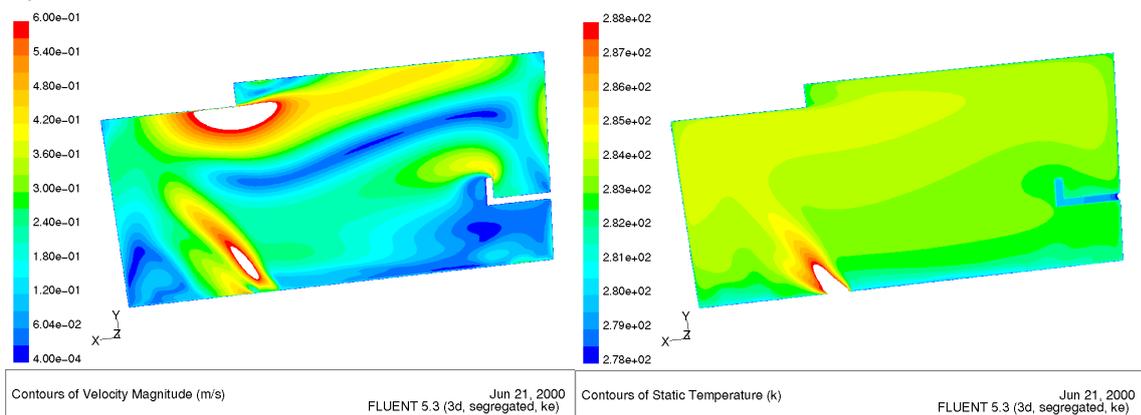


Abbildung 5.10: KH-LH-C, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

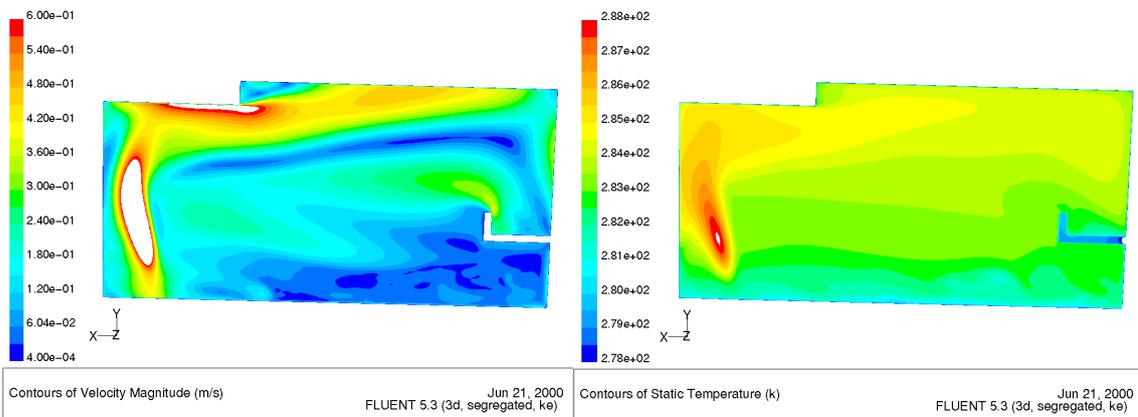


Abbildung 5.11: KH-LH-D, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

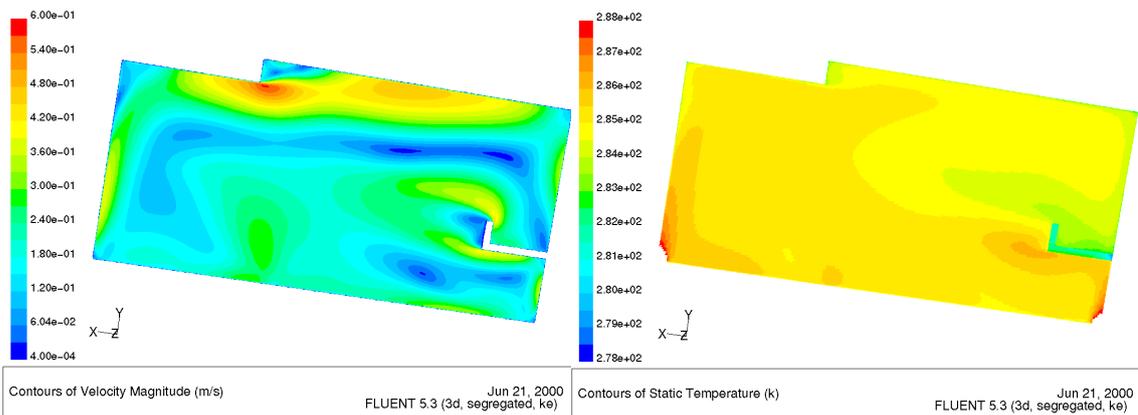


Abbildung 5.12: KH-LH-E, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

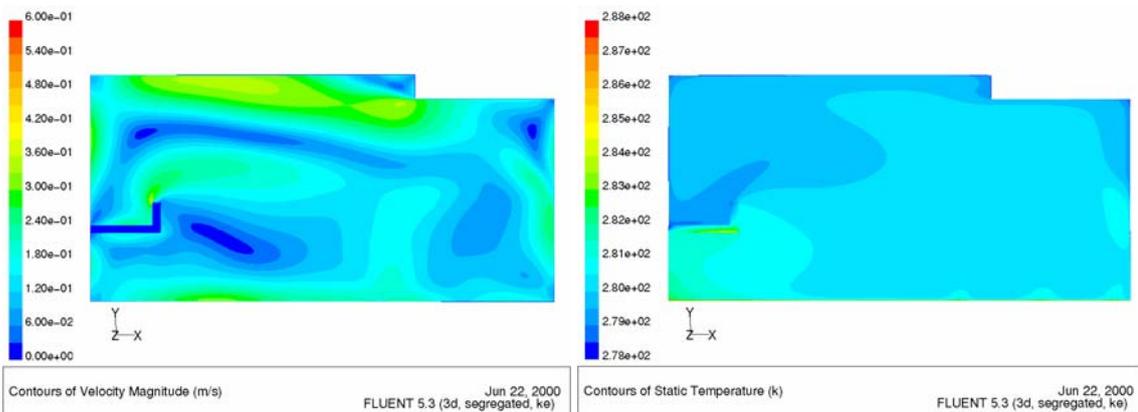


Abbildung 5.13: KH-FH-A, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf einem Längsschnitt in 1m Entfernung von der Symmetrieebene

5.2.3 Geschwindigkeit und Temperatur an Oberflächen (KH)

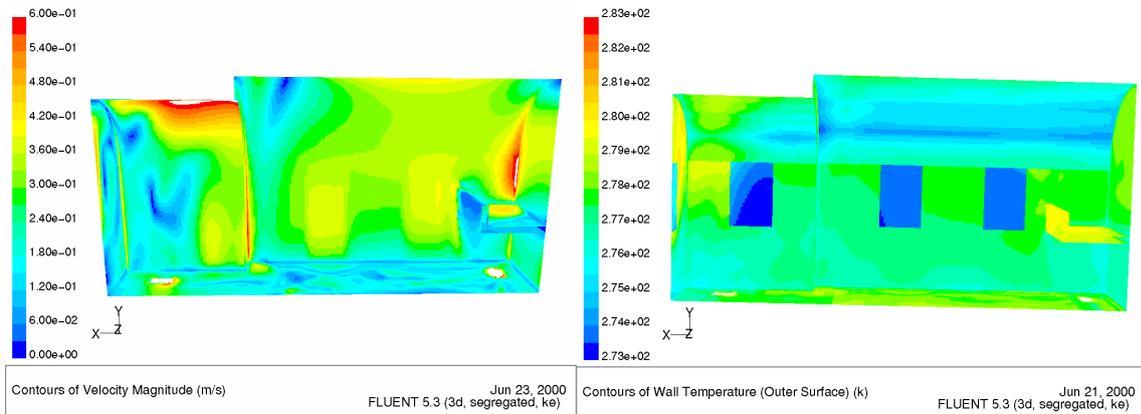


Abbildung 5.14: KH-LH-A, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] der Oberflächen

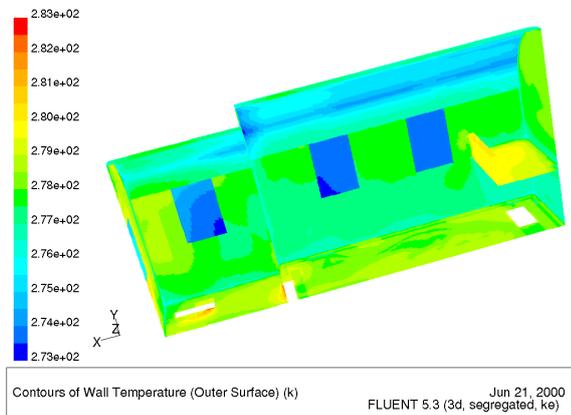


Abbildung 5.15: KH-LH-B, Konturplot der Temperatur [K] der Oberflächen

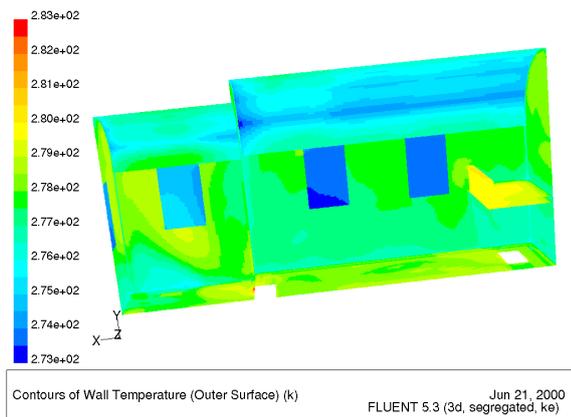


Abbildung 5.16: KH-LH-C, Konturplot der Temperatur [K] der Oberflächen

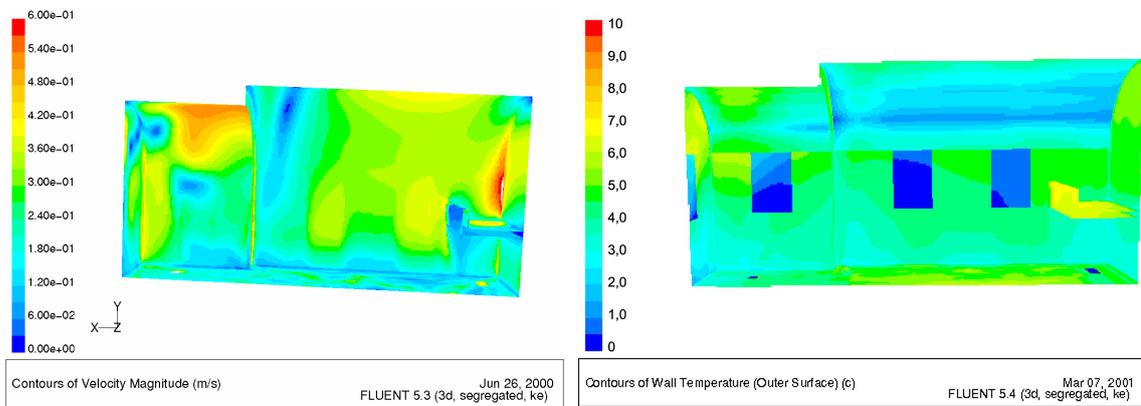


Abbildung 5.17: KH-LH-D, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] der Oberflächen

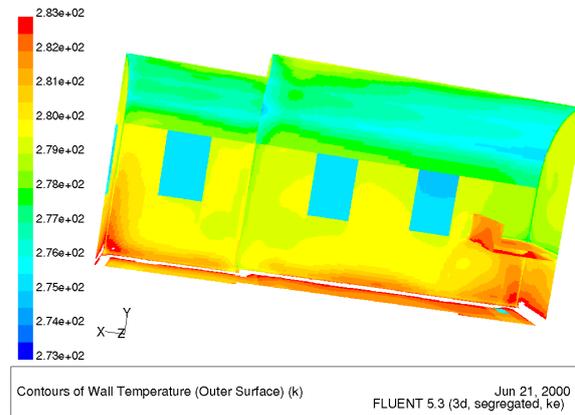


Abbildung 5.18: KH-LH-E, Konturplot der Temperatur [K] der Oberflächen

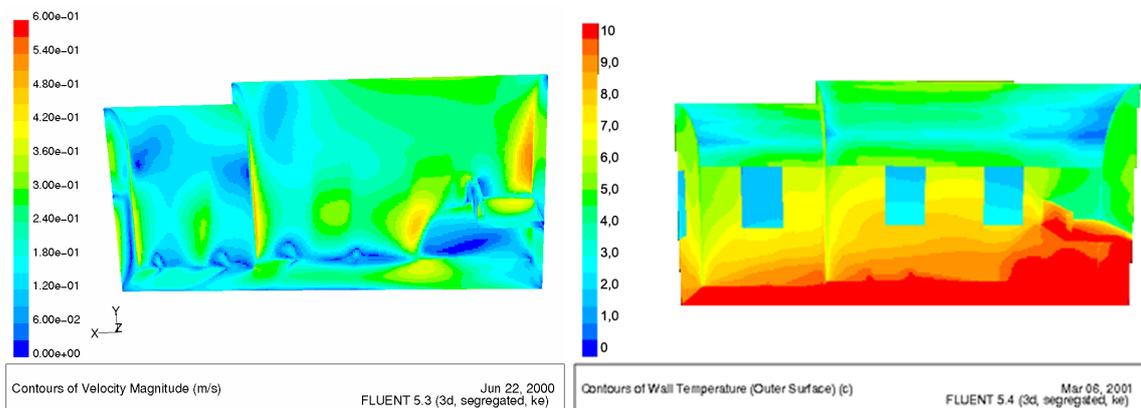


Abbildung 5.19: KH-FH-A, Konturplot der Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] der Oberflächen

5.2.4 Geschwindigkeit und Temperatur für Kirchenscheiben

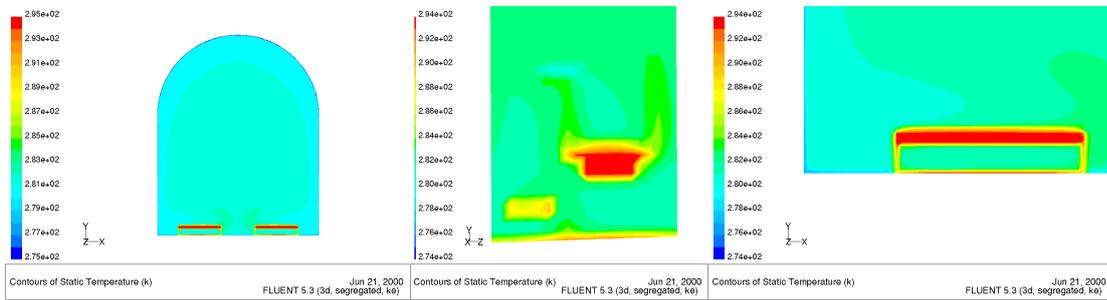


Abbildung 5.20: KS-BH: Konturplot der Temperatur [K] für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links), ein Detail des Längsschnittes (Mitte) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

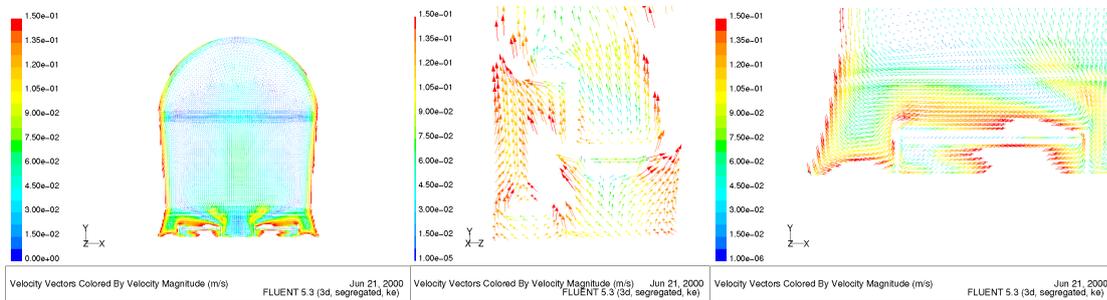


Abbildung 5.21: KS-BH: Vektorplot der Geschwindigkeit bis 0.15m/s für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links), ein Detail des Längsschnittes (Mitte) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

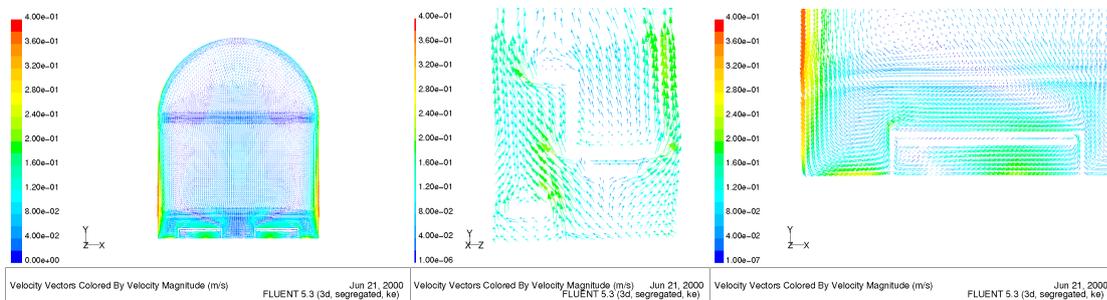


Abbildung 5.22: KS-BH: Vektorplot der Geschwindigkeit bis 0.4m/s für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links), ein Detail des Längsschnittes (Mitte) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

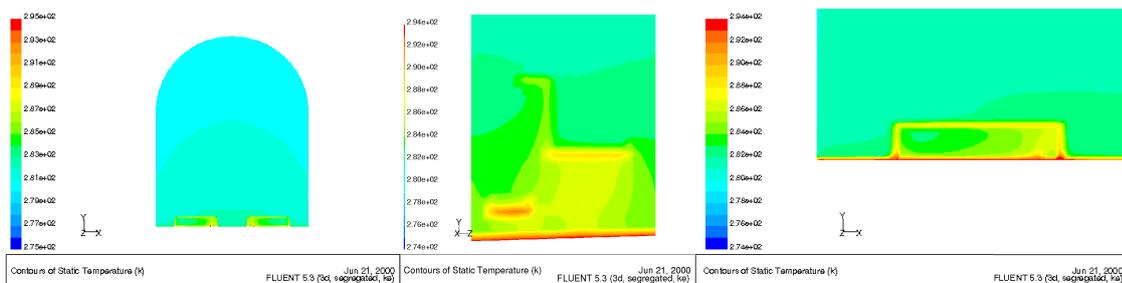


Abbildung 5.23: KS-FH: Konturplot der Temperatur [K] für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links), ein Detail des Längsschnittes (Mitte) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

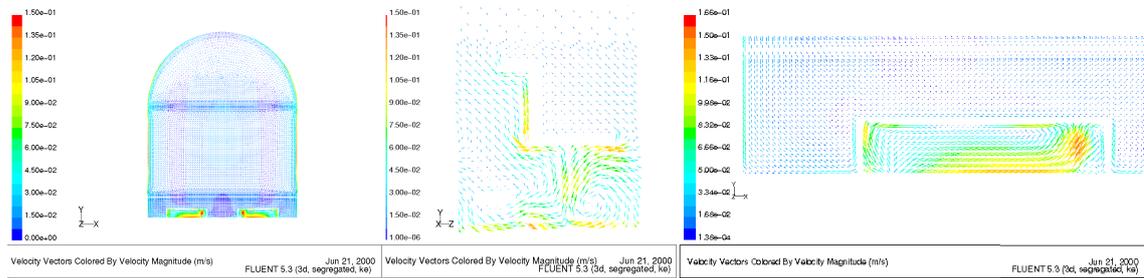


Abbildung 5.24: KS-FH: Vektorplot der Geschwindigkeit bis 0.15m/s für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links), ein Detail des Längsschnittes (Mitte) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

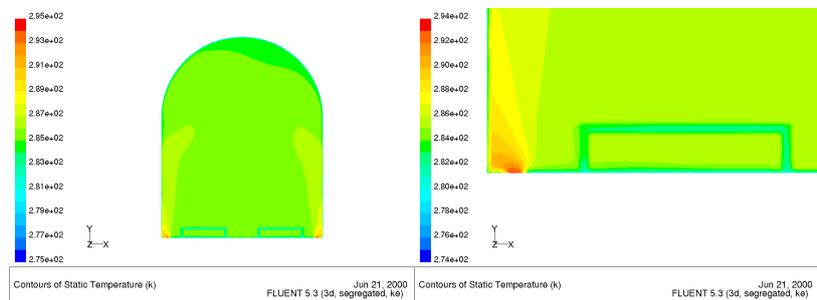


Abbildung 5.25: KS-LH: Konturplot der Temperatur [K] für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

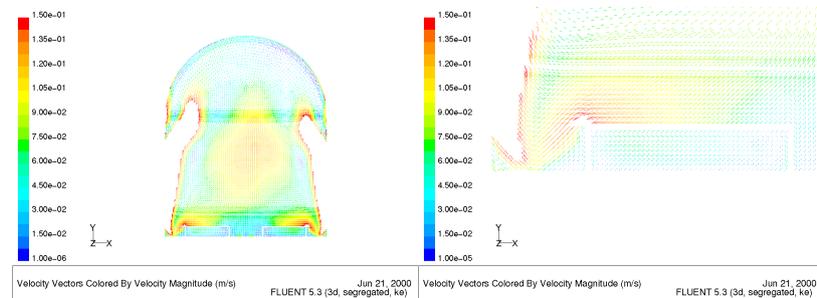


Abbildung 5.26: KS-LH: Vektorplot der Geschwindigkeit bis 0.15m/s für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

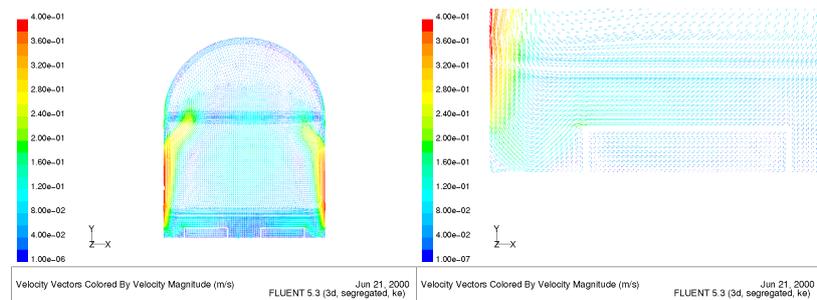


Abbildung 5.27: KS-LH: Vektorplot der Geschwindigkeit bis 0.4m/s für den Querschnitt durch die Kirchenscheibe (links) und ein Detail des Querschnittes (rechts)

5.2.5 Geschwindigkeit und Temperatur - Histogramme

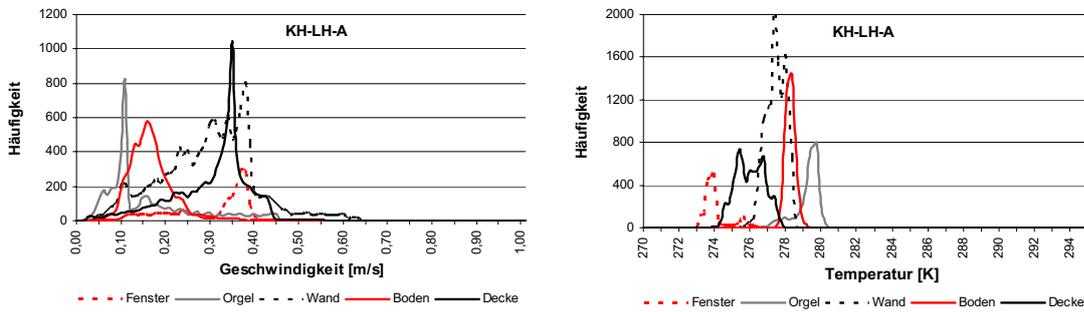


Abbildung 5.28: KH-LH-A, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

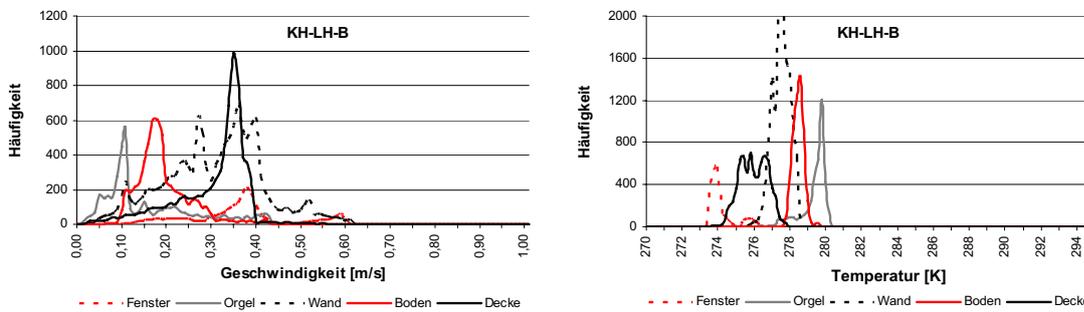


Abbildung 5.29: KH-LH-B, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

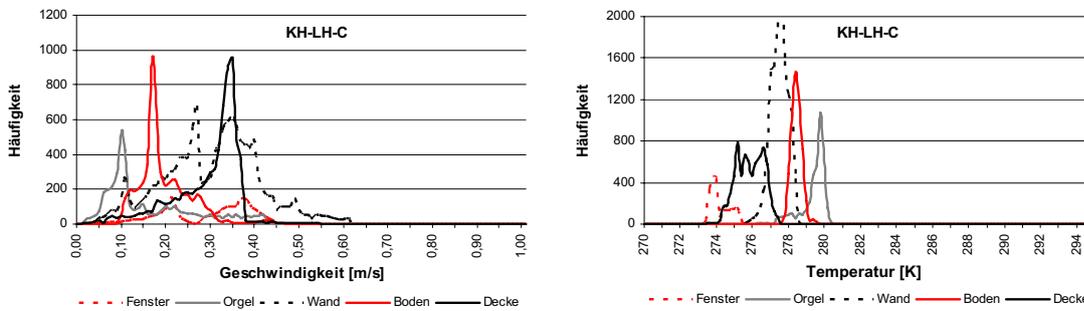


Abbildung 5.30: KH-LH-C, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

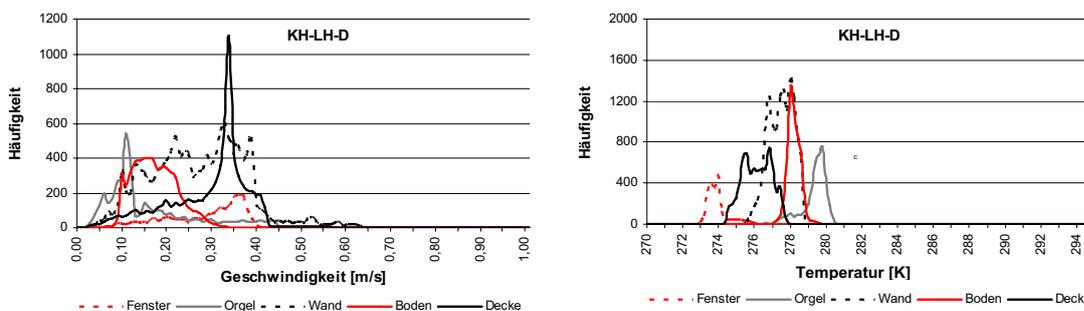


Abbildung 5.31: KH-LH-D, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

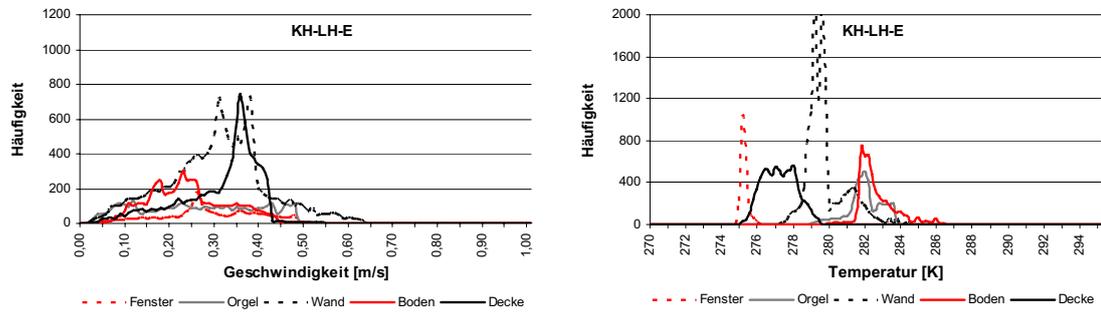


Abbildung 5.32: KH-LH-E, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

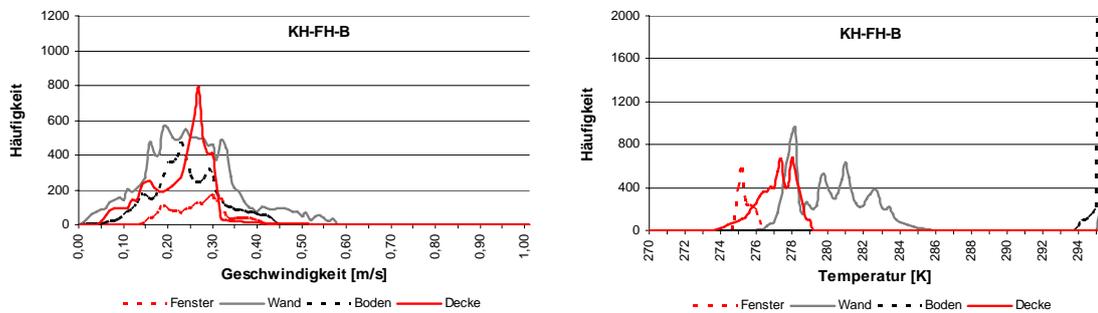


Abbildung 5.33: KH-FH-B, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

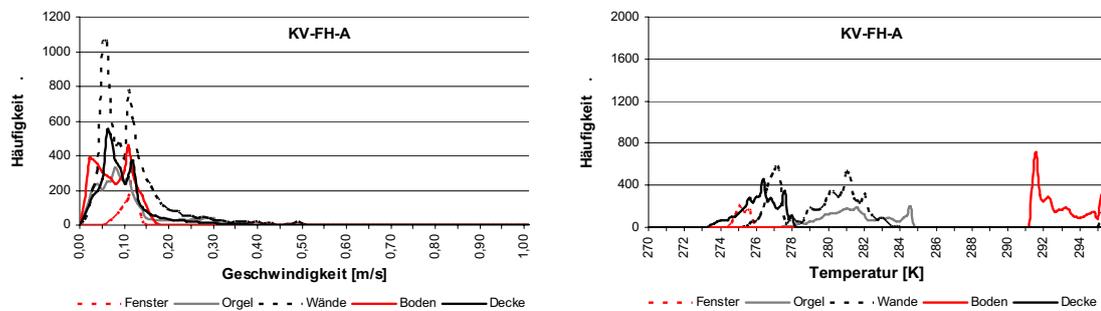


Abbildung 5.34: KV-FH-A, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

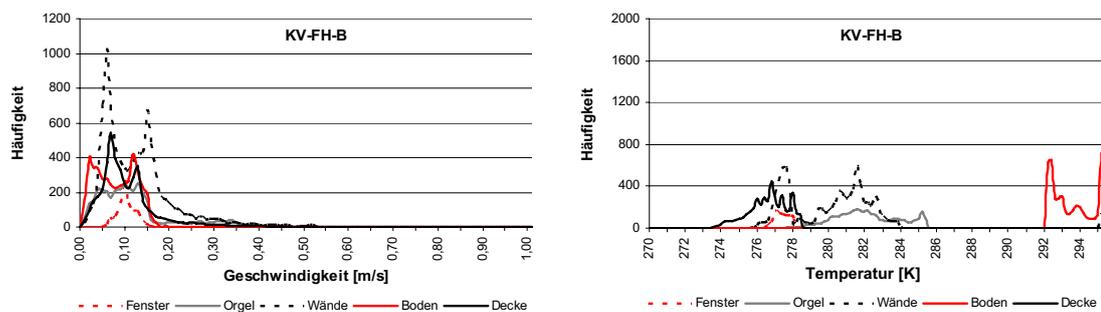


Abbildung 5.35: KV-FH-B, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

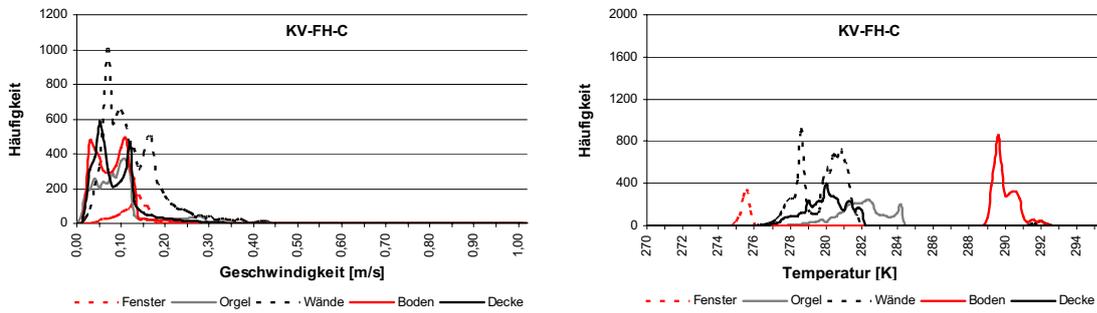


Abbildung 5.36: KV-FH-C, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

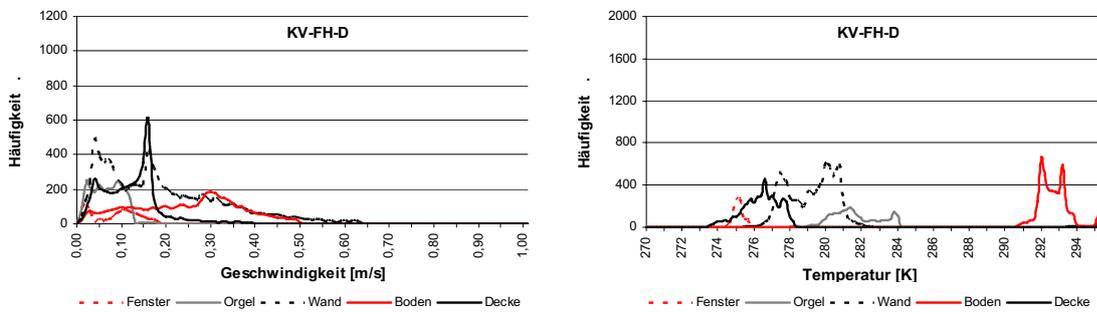


Abbildung 5.37: KV-FH-D, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

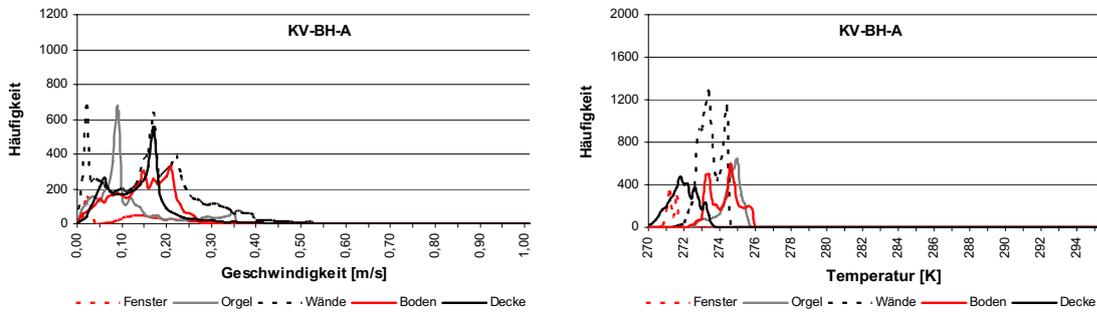


Abbildung 5.38: KV-BH-A, Häufigkeitsverteilungen von Geschwindigkeit (m/s) und Temperatur [K] auf den einzelnen Teilflächen

5.3 Vergleich von unterschiedlichen Heizungssystemen

Wie schon in der Einleitung zu diesem Kapitel beschrieben, macht es CFD möglich, den Einfluss einzelner Parameter bei ansonsten gleichen Randbedingungen zu untersuchen: In einer realen Kirche ist es in der Regel nicht möglich, das Heizungssystem auszutauschen, nur um messen zu können, wie sich das Raumklima verändert. Und auch der Einfluss besserer Fenster oder einer Isolierung können nicht durch Ausprobieren ermittelt werden. Der Vergleich unterschiedlicher Heizungssysteme bei der Auswertung der Raumklimamessungen schließt unwillkürlich auch den Einfluss von Gebäudegeometrie, Außenklima und unterschiedlicher Nutzung ein. Schon Schellen [2002] streicht diesen Vorteil der numerischen Simulation heraus, wenn er auch bezüglich der absoluten Genauigkeit skeptisch bleibt, da zu viele Randbedingungen im Bestand ungenügend bekannt sind.

In den folgenden Abschnitten werden die simulierten Fälle nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet.

5.3.1 Heizungssysteme

Der Einfluss des Heizungssystems auf das Raumklima und die Möglichkeiten der Auswertung der Simulationen werden im folgenden anhand von drei Beispielen aufgezeigt:

- KH-FH-B: Simulation der halben Kirche mit Fußbodenheizung und einer Wärmeabgabeleistung von 118W/m^2
- KH-LH-D: Simulation der halben Kirche mit Luftheizung und 45°C warme Luft, Zuluftgeschwindigkeit 1 m/s , Zuluftauslass im Altarbereich, Abzug unter der Orgelempore und insgesamt 15.5 kW Leistung
- KH-LH-E: Simulation der halben Kirche, ebenfalls mit Luftheizung, diesmal mit 20°C warmer Luft, nur 0.1m/s aber entsprechend großflächiger Zuluftöffnung rundum, der Wand entlang

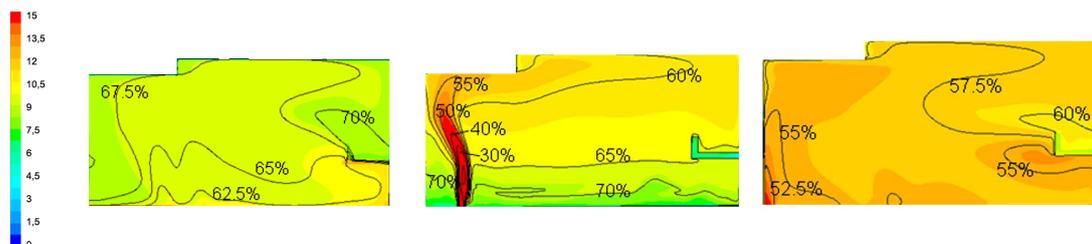
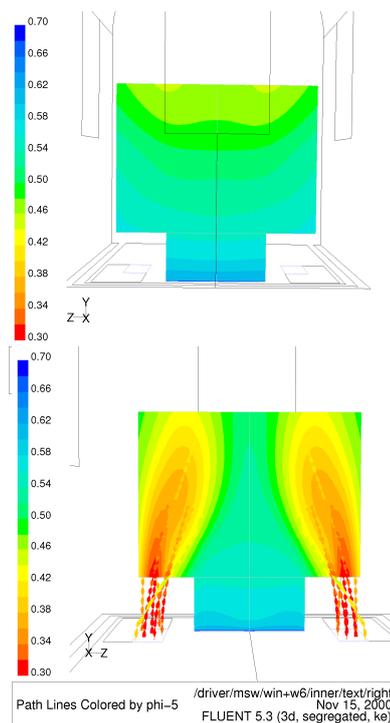


Abbildung 5.39: Temperatur und relative Feuchtigkeit auf einem Längsschnitt, 1 m von der Längsachse der Kirche versetzt, für die Fußbodenheizung (KH-FH-B), Luftheizung mit 45°C warmer Luft (KH-LH-D) und Luftheizung mit Zuluft einlass längs des Umfangs (KH-LH-E)

Bei der mit Fußbodenheizung temperierten Kirche (ganz links in Abbildung 5.39) ist die Temperaturverteilung recht gleichmäßig, im Aufenthaltsbereich der Gläubigen eher etwas wärmer als unter der Decke, die mittlere Temperatur liegt bei etwa 9 bis 10°C. Unter der Orgelempore wird es am wärmsten, darüber ist es, da keine zusätzliche Heizungsfläche vorgesehen wurde, etwas kühler. Für die Berechnung der relativen Feuchtigkeit wurde davon ausgegangen, dass im Raum keine Feuchtigkeitsquellen oder -senken vorhanden sind und sich die absolute Feuchtigkeit gleichmäßig im Raum verteilt (siehe Abschnitt 5.1.8). In diesem Fall wurden für die Berechnung der relativen Feuchtigkeit 6 g/m³ angesetzt, ein Wert, wie er in Kirchen in Südtirol häufig anzutreffen ist. Da keine nennenswerten Temperaturgradienten zu verzeichnen sind, ist entsprechend auch die Verteilung der relativen Feuchtigkeit, die sich ja aus absoluter Feuchtigkeit und Temperatur ergibt, gleichmäßig.



Path Lines Colored by phi-5 /driver/msw/win+w6/inner/text/right
 Nov 15, 2000
 FLUENT 5.3 (3d, segregated, ke)

Abbildung 5.40: Relative Feuchtigkeit der Zuluft und nahe der Oberfläche des Hochaltares vorn (unten) und hinten (oben) (hier KH-LH-A)

Derselbe Schnitt bei Luftheizung mit 45°C warmer Luft lässt deutlich die einströmende warme Luft im Altarbereich erkennen. Im Aufenthaltsbereich der Gläubigen liegt die Temperatur bei etwa 7°C, unter der Decke bei 11–12°C. Vor allem im Altarraum ist der Temperaturgradient deutlich ausgeprägt, entsprechend groß sind auch die Unterschiede der relativen Feuchtigkeit auf engem Raum: unter 30% die Zuluft, 70% die Luft unten und 50% unter der Decke. Altäre in diesem Bereich wären an Vorder- und Rückseite sehr unterschiedlichen Feuchtigkeiten ausgesetzt, Kruzifixe würden oben deutlich stärker austrocknen als unten (Abbildung 5.40). Folgen davon wären Materialspannungen und Risse.

Das dritte Bild zeigt den Schnitt bei LH rundum - deutlich erkennbar die Zuluft vorn und hinten. Hier ist die Temperaturverteilung, ähnlich wie bei der Fußbodenheizung, sehr gleichmäßig, entsprechend gleichmäßig ist auch die relative Feuchtigkeit.

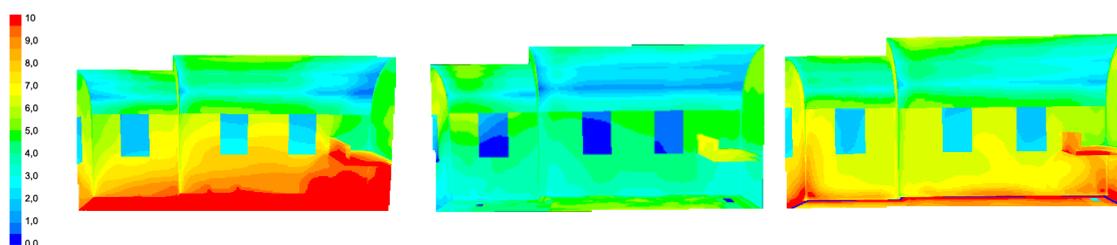


Abbildung 5.41: Oberflächentemperatur für Fußbodenheizung (KH-FH-B), Luftheizung mit 45°C warmer Luft (KH-LH-D) und Luftheizung mit Zuluft einlass längs des Umfangs (KH-LH-E)

Die Oberflächentemperaturen unterscheiden sich in den drei Fällen beträchtlich: Bei der Fußbodenheizung, ganz links in Abbildung 5.41, liegen die Oberflächentemperaturen im unteren Bereich der Wand mit 8 bis 9°C nur wenig unter den Lufttemperaturen im Raum, nach oben sinken sie allerdings deutlich ab. Besonders die Randbereiche an der Decke weisen, wie auch die Fenster, ziemlich niedrige Temperaturen auf. Bei der Luftheizung mit 45°C warmer Zuluft sind die Oberflächentemperaturen durchwegs deutlich niedriger. Auch hier sind Fenster und Decke die kältesten Bereiche, aber im Gegensatz zum vorhergehenden Beispiel ist diesmal auch der Sockelbereich der Wände mit etwa 3°C ziemlich kalt. Die rundum laufende Luftheizung vermeidet dieses Problem erwartungsgemäß, die Temperatur der Wände liegt durchwegs über 6°C und im Sockelbereich eher darüber. Decken- und Fenstertemperatur sind ähnlich wie bei der Fußbodenheizung.

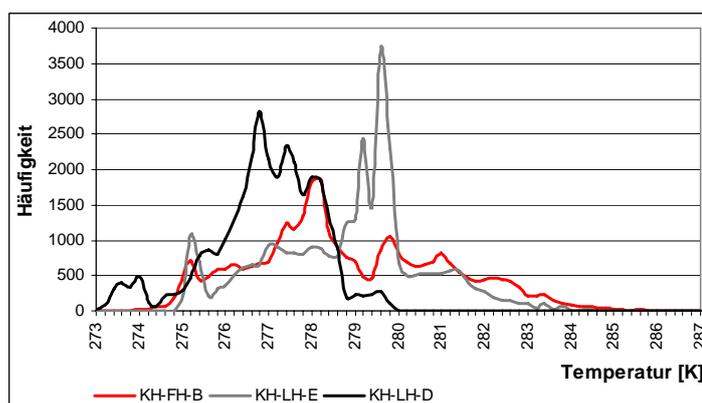


Abbildung 5.42: Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen für Fußbodenheizung (KH-FH-B), Luftheizung mit 45°C warmer Luft (KH-LH-D) und Luftheizung mit Zuluft einlass längs des Umfangs (KH-LH-E)

Eine quantitative Auswertung der Oberflächentemperaturen und die Darstellung als Häufigkeitskurve (Abbildung 5.42) zeigt klar, dass bei der Luftheizung mit 45°C warmer Luft (i) Temperaturen unter 2°C auftreten und (ii) der Anteil von Oberflächen unter 5°C doppelt so groß ist wie bei den anderen beiden Heizungsvarianten.

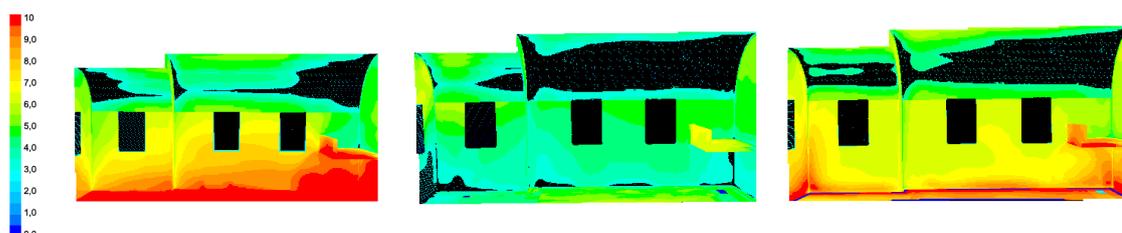


Abbildung 5.43: Kondensationsrisiko - die Flächen mit potentieller Kondensation bei einer absoluten Feuchtigkeit von 6 g/m³ sind schwarz dargestellt

Was bedeuten diese Oberflächentemperaturen in Bezug auf das Kondensationsrisiko? Im Fall der Fußbodenheizung ist Tauwasserausfall an den Fenstern und an Teilen der Decke zu erwarten - bei der schon vorher herangezogenen absoluten Feuchte von 6 g/m^3 . Bei der Luftheizung (45°C -Variante) ist darüber hinaus auch der Sockelbereich kondensationsgefährdet. Die rundum-Variante der Luftheizung verhält sich ähnlich wie die Fußbodenheizung.

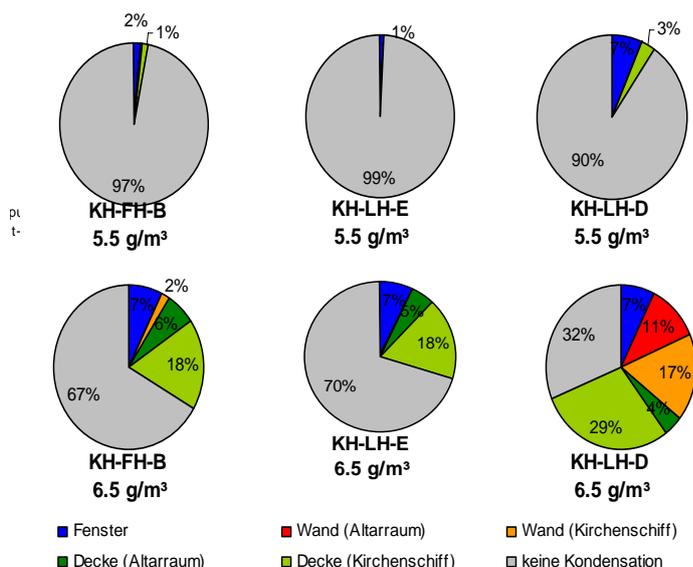


Abbildung 5.44: Anteil der kondensationsgefährdeten Fläche an der gesamten Oberfläche, nach betroffenen Bereichen, für 5.5 g/m^3 respektive 6.5 g/m^3

Die detaillierte quantitative Analyse der Oberflächentemperaturen in Relation zur Taupunkttemperatur für unterschiedliche absolute Feuchtigkeiten ergibt für die Fußbodenheizung (KH-FH-B) bei 5.5 g/m^3 Kondensation auf 3% der Fläche, wobei im Wesentlichen die Fenster und kleine Bereiche der Decke im Altarraum betroffen sind. Bei 6.5 g/m^3 wäre hingegen schon ein Drittel der Fläche kondensationsgefährdet: Betroffen sind die Fenster (7% entsprechen dem Anteil der gesamten Fensterfläche an den untersuchten Flächen), die Decke sowohl im Altarraum als auch im Kirchenschiff, und zu einem kleinen Anteil auch die Wand (aus Vergleich mit Abbildung 5.43 im Bereich der Orgelempore). Die Situation bei der Luftheizung entlang des Umfangs (KH-LH-E) ist sehr ähnlich: praktisch keine Kondensation bei absoluter Feuchte unter 5.5 g/m^3 und für die höhere Feuchtigkeit ähnliche Werte wie bei Fußbodenheizung. Wesentlich schlechter schneidet die Luftheizung mit konzentriertem Zuluftgitter und höherer Zulufttemperatur (KH-LH-D) ab: Schon bei der niedrigeren Feuchtigkeit kommt es auf 10% der Fläche zur Kondensation, und zwar auf der gesamten Fensterfläche und zudem im Bereich der Decke.

Bei der größeren Feuchtigkeit käme es in diesem Fall auf zwei Dritteln der Fläche zur Kondensation - und zwar im Gegensatz zu den anderen beiden Heizungsvarianten auch im Wandbereich im ähnlichen Ausmaß wie an der Decke.

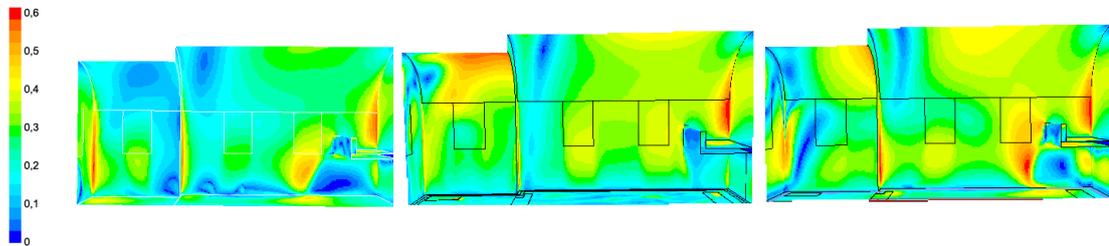


Abbildung 5.45: Luftgeschwindigkeit in der wandnächsten Zelle für Fußbodenheizung (KH-FH-B), Luftheizung mit 45°C warmer Luft (KH-LH-D) und Luftheizung mit Zuluft einlass längs des Umfangs (KH-LH-E)

Neben Temperatur und Feuchtigkeit spielt die Luftgeschwindigkeit in Oberflächennähe bei verschiedenen Schadensmechanismen (siehe Abschnitt 2.3) eine wichtige Rolle. Ganz links in Abbildung 5.45 wieder die Fußbodenheizung: Die höchste Geschwindigkeit erreicht die Luft in den Ecken, wenn sie an der kalten Wand (Kältebrücken) abkühlt und nach unten strömt. Deutlich erkennbar ist auch der Kaltluftabfall bei den Fenstern. Bei der Luftheizung mit 45°C warmer Luft und hoher Zuluftgeschwindigkeit ist die Luftgeschwindigkeit an der Decke insgesamt höher, insbesondere natürlich an der Decke im Altarbereich über dem Luftauslass. Auch hier erkennbar der Kaltluftabfall in der hinteren Raumkante und bei den Fenstern im Kirchenschiff. Auch bei der zweiten Variante der Luftheizung ist die Geschwindigkeit nahe der Oberfläche eher größer als bei der Fußbodenheizung. Dabei sind es wieder vor allem die Raumkanten, aber auch die Fenster und zum Teil der Deckenbereich, die zu den Problemzonen zählen.

Hingewiesen sei hier noch darauf, dass allen drei Fällen eine stationäre Rechnung zugrunde liegt. Wie die Raumklimamessung (Abschnitt 4.3) gezeigt hat, sind Temperaturgradient und Oberflächentemperaturen im Falle von instationärem Heizen, wie es mit Luftheizungen auch heute noch oft betrieben wird, eher noch kritischer als hier bei Darstellung des durchgehenden Heizens erkennbar.

5.3.2 Einfluss von Temperatur, Geschwindigkeit und Auslass der Zuluft

Da schon die Raumklimamessungen gezeigt haben, dass Luftheizung nicht gleich Luftheizung ist, wurde die Luftheizung in fünf Varianten simuliert. Variiert wurden Zulufttemperatur und

-geschwindigkeit sowie die Positionen von Zuluft und Abluft, während die eingebrachte Leistung annähernd konstant blieb - wie die sehr ähnlichen mittleren Lufttemperaturen bestätigen (siehe Tabelle 5.6). Einzige Ausnahme ist KH-LH-E, bei welcher die Heizluft entlang des Perimeters eingebracht wird, die eine im Mittel 1.5 K höhere Lufttemperatur erreicht.

Im Vergleich zur Basisvariante, bei welcher 21°C warme Luft mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s im Altarraum über einen 0.5 m² großen Auslass in die Kirche geblasen wird, ist es bei den Varianten B und C, welche Zuluft der gleichen Temperatur, aber langsamer (0.25 m/s), über größere Auslässe einbringen (je 1 m² im Altarraum und im vorderen Kirchenschiff bzw. 2 m² im vorderen Kirchenschiff) im Aufenthaltsbereich der Personen um etwa 0.5 K wärmer, während es bei Variante D, bei welcher 45°C warme Luft mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s über einen kleinen Auslass im Altarraum eingeblasen wird, im Aufenthaltsbereich der Personen um etwa 0.5 K kälter (vgl. Tabelle 5.6).

In allen vier Fällen ist es im Aufenthaltsbereich aber auf jeden Fall 1–2K kälter als im Mittel (vgl. Tabelle 5.6) und 2–3 K kälter als unter der Decke (vgl. Abbildungen 5.8 bis 5.11). Dieses Phänomen konnte nur durch die sehr verteilte Wärmeeinbringung von Variante E vermieden werden: Dort ist die Temperaturverteilung im Raum insgesamt sehr gleichmäßig (vgl. Abbildung 5.12).

Die Oberflächentemperaturen (vgl. Abbildungen 5.14 bis 5.18) sind bei allen Varianten an der Decke am niedrigsten - trotz der oben festgestellten Tendenz zum Warmluftpolster unter der Decke. Dies liegt im simulierten Fall wesentlich am schlechteren U-Wert der Decke im Vergleich zur Wand, was jedoch zumindest für Kirchen in Südtirol als typisch bezeichnet werden kann. Die Varianten A bis D sind außerdem im unteren Bereich der Wände sehr kalt. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen im Fall der 45°C warmen Zuluft, insbesondere im Altarraum und unter der Orgelempore. Die Heizluftzuführung entlang des Perimeters in Variante E vermeidet das Problem selbstredend.

Die mittleren Geschwindigkeiten liegen nach Tabelle 5.6 zwischen 0.17 m/s und 0.21 m/s, wobei die Varianten A bis C die größeren Spitzen und weite Bereiche mit Geschwindigkeiten über 0.6 m/s aufweisen (vgl. Abbildungen 5.8 bis 5.12). In den Abbildungen 5.14 und 5.17 sind klar die Strömungen an den kalten Kanten sowie der Kaltluftabfall unter den Fenstern

erkennbar. Die Histogramme (Abbildungen 5.28 bis 5.32) zeigen, dass vom Geschwindigkeitsbereich über 0.3 m/s, abgesehen von den Fenstern, vor allem die Decke und Teile der Wände betroffen sind. Im Aufenthaltsbereich weist Variante E mit mittleren 0.2 m/s mit Abstand die höchste Luftgeschwindigkeit auf.

Im Falle von instationärem Heizen sind insgesamt deutlich größere Temperaturgradienten und niedrigere Oberflächentemperaturen zu erwarten (siehe Kapitel 4).

5.3.3 Einfluss der Gebäudehülle

Anhand der drei Varianten KV-FH-A, KV-FH-B und KV-FH-C lässt sich gut beobachten, was sich mit Verbesserungsmaßnahmen am Gebäude aus wärmetechnischer Sicht erreichen lässt:

	KV-FH-A	KV-FH-B	KV-FH-C
	Flächen [m ²]		
Boden	40		
Wand	97		
Fenster	9		
Decke	63		
	U-Wert [W/m ² K]		
Wand	1.16		
Fenster	3.13	2.3	3.13
Decke	1.48	0.2	
	Außentemperatur [°C]		
	-10		
	Leistung [W/m ²]		
	100		65

Abbildung 5.46: Übersicht Kenngrößen der untersuchten Varianten

Alle drei Varianten sind mit Fußbodenheizung ausgestattet, die ersten beiden mit einer Leistung von 100W/m², bei Variante C reicht hingegen schon die um ein Drittel reduzierte Heizleistung (65 W/m²), um eine ähnliche Raumlufttemperatur zu erreichen. Variante B hat im Vergleich zur Basisvariante KV-FH-A verbesserte Fenster, Variante C eine gedämmte Decke (siehe Tabelle 5.46).

Durch die bessere Verglasung in Variante B steigt die mittlere Temperatur der Fensteroberfläche um mehr als 2 K von 275.1 K bei der Basisvariante auf 277.3 K an. Damit liegt sie bei einer absoluten Feuchtigkeit 5.5 g/m³ über der Taupunkttemperatur, an den Fenstern ist also keine Kondensation mehr zu erwarten. Allerdings bleibt die Oberflächentemperatur an der Decke weiterhin stellenweise unter dem Taupunkt, sodass es in der Folge in dieser Region vermehrt zu Kondensation kommen wird - und zwar unter Umständen stärker als bei der Basisvariante. Da in der Basisvariante nämlich sowohl die Temperaturen an der Decke als auch am Fenster den Taupunkt unterschreiten, der Taupunkt Abstand bei letzterem jedoch kleiner ist, würde es zuerst und in größeren Mengen am Fenster zum Ausfallen von Wasserdampf kommen. Der Wärmestrom durch die Fenster sinkt auf zwei Drittel ab, der gesamte Wärmebedarf kann jedoch nicht wesentlich reduziert werden.

Die Isolierung der Decke, die in diesem Fall den U-Wert auf ein Achtel reduziert, wirkt sich, wärmetechnisch gesehen, günstiger aus als die Isolierung der Fenster, da sie zu einer Ver-

gleichmäßigung der Oberflächentemperatur führt. Dass sich in der Abbildung 5.47 auch das Kondensationsrisiko am Fenster verringert, liegt an der etwas höheren mittleren Raumtemperatur, die sich trotz der Reduzierung der Heizleistung auf 65% einstellt. Ob eine Kondensation am Fenster zugelassen werden kann, und wie der Aufbau der Decke darauf reagiert, dass er nun im Winter komplett im warmen Bereich liegt, ist aber auf jeden Fall am konkreten Objekt zu überlegen und zu prüfen.

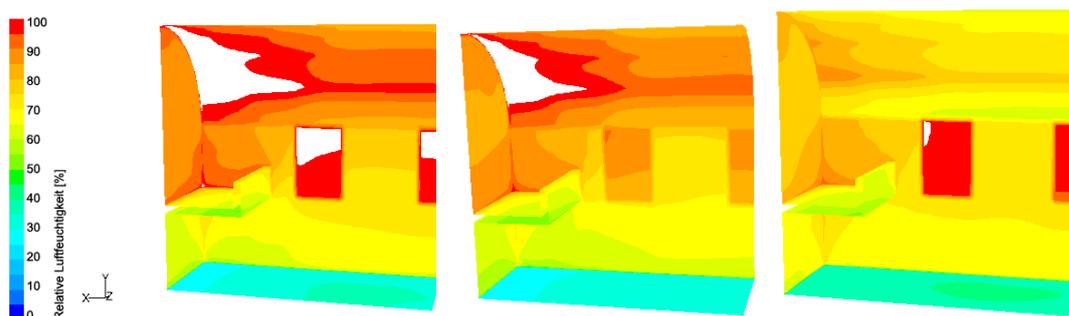


Abbildung 5.47: Relative Feuchtigkeit [%] an der Oberfläche bei einer absoluten Feuchtigkeit von 5.5g/m^3 für die Varianten KV-FH-A, KV-FH-b und KV-FH-C; die roten Flächen sind kondensationsgefährdet

5.3.4 Luftheizung, Fußbodenheizung und Bankheizung : Vergleich des Raumklimas im Aufenthaltsbereich anhand der Kirchenscheibe

Die Simulation der Kirchenscheibe dient in erster Linie der Beurteilung der Verhältnisse im Aufenthaltsbereich. Simuliert wurden eine Bankheizung, eine Fußbodenheizung (welche mit 100W/m^2 der Variante A von KH und KV entspricht) und eine Luftheizung entlang des Perimeters (entspricht KH-LH-E), da dies die in der Kirchenscheibe einzig sinnvoll nachbildbare Luftheizung ist.

An den im Abschnitt 5.2.4 graphisch dargestellten Simulationsergebnissen sticht als Erstes ins Auge, dass die Geschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich im Fall der Fußbodenheizung mit Abstand am geringsten sind: Die Skala bis 0.15 m/s reicht hier zur Darstellung der Ergebnisse vollends aus (vgl. Abbildung 5.24), während sie für die anderen beiden Varianten bis 0.4 m/s erweitert werden muss (vgl. Abbildungen 5.21 und 5.22, bzw. 5.26 und 5.27).

Bei der Fußbodenheizung entsteht im Wesentlichen eine leichte Auftriebsströmung zur Mitte der Kirche hin. Die Luft, die durch den Bankbereich streicht, kommt zwar vom Außengang, wird aber vor Erreichen des Bankbereiches schon vorgewärmt:

Vor allem im Fußbereich ist es bei der Fußbodenheizung deutlich wärmer als bei der Bankheizung, im Bereich der Oberkörper ist die Temperatur ähnlich wie bei der Bankheizung, aber durch die geringere Geschwindigkeit weniger unangenehm.

Sowohl bei der Bankheizung als auch bei der Luftheizung steigt die Geschwindigkeit im Bankbereich auf über 0.15 m/s an. Im Fall der Luftheizung handelt es sich hierbei um einen Luftstrom von der Kirchenmitte zur Außenwand hin, den die dort aufsteigende warme Zuluft ansaugt. Bei der Bankheizung sind die Werte nicht nur höher, sondern wird zudem die kalte Luft vom Außengang angesogen und erst im Bankbereich wieder erwärmt. Auch der Kaltluftabfall am Fenster ist gut erkennbar: Er erreicht Geschwindigkeiten über 0.3 m/s. Aus der Sicht der Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich ist die untersuchte Bankheizung deshalb am kritischsten zu beurteilen.

Die Simulation der Kirchenscheibe dient, wie gesagt, in erster Linie der Beurteilung der Verhältnisse im Aufenthaltsbereich. Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 5.48 noch die Oberflächentemperaturen dargestellt, die z.B. im Vergleich mit Abbildung 5.3 zeigen, dass die Ergebnisse für die Scheibe jenen des Kirchenviertels hinreichend ähnlich sind.

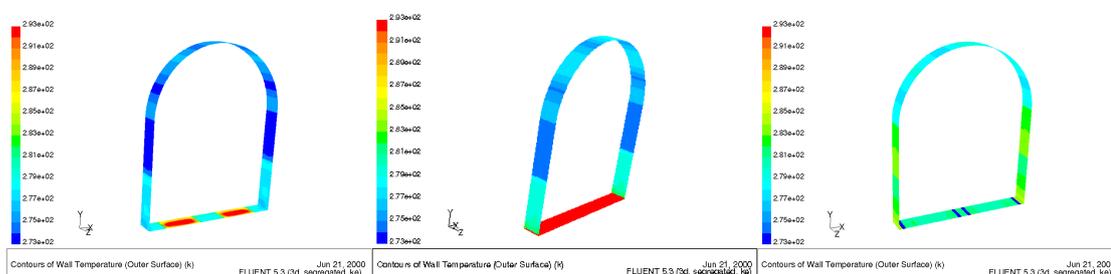


Abbildung 5.48: Oberflächentemperatur für die drei simulierten Varianten der Kirchenscheibe: Bankheizung (KS-BH), Fußbodenheizung (KS-FH) und Luftheizung (KS-LH)

5.4 Fallbeispiel: Pfarrkirche von Branzoll

Im Rahmen des Projektes konnte die Erneuerung des Heizungssystems in der Pfarrkirche von Branzoll begleitet werden: Nach der raumklimatischen Untersuchung der Ausgangslage wurden mittels CFD-Simulation mehrere mögliche Heizungssysteme untersucht und darauf aufbauend Empfehlungen ausgearbeitet. Nach Einbau der neuen Heizung wurde das Raumklima erneut aufgenommen, sodass der Erfolg der Maßnahme überprüft und das Simulationsergebnis validiert werden konnten.

5.4.1 Ausgangssituation in der Pfarrkirche von Branzoll

Die Pfarrkirche zum Hlgst. Herzen Jesu liegt im Dorfzentrum von Branzoll und ist mindestens einmal täglich für Gottesdienste und gemeinsame Gebetsstunden in Verwendung. Zu Beginn der Untersuchung ist die Kirche mit einer Luftheizung ausgestattet, welche in der Regel eine halbe Stunde vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet und am Ende des Gottesdienstes wieder ausgeschaltet wird. Der Lufteinlass und -abzug befinden sich vorn im rechten Seitenschiff: der Einlass an der Frontwand in einer Höhe von 6 m, der Abzug am Boden (Abbildung 5.49).

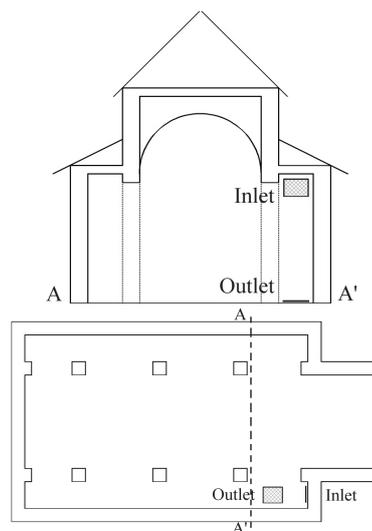


Abbildung 5.49: Grundriss- und Querschnittsschema der Pfarrkirche von Branzoll

Die Messungen zeigten drei Problembereiche auf:

1. Das vertikale Temperaturprofil ist während des Heizens sehr ausgeprägt, eine Temperaturspreizung von 10 K zwischen Bankbereich und Decke keine Seltenheit.
2. Die relative Feuchtigkeit an der Decke und im Bereich der Orgel schwankt stark und sinkt zum Teil unter 30%.
3. Die absolute Feuchtigkeit ist gleichzeitig dennoch so hoch, dass an kalten Wandbereichen - vor allem im Sockelbereich, aber nicht nur - Kondensation auftritt.

Aus der Darstellung der Temperaturen an den einzelnen Messstellen im Längsschnitt (Abbildung 5.51) wird deutlich, dass sich ein Großteil der Wärme im oberen Teil der Kirche sammelt. Abbildung 5.50 zeigt am typischen Temperaturverlauf während eines Sonntagmorgens, dass die Temperatur während des Heizens unter der (hölzernen) Decke sehr schnell auf Temperaturen über 20°C, auf der Orgelempore immerhin auf 18°C anstieg. In den Bänken hingegen nahm die Temperatur erst mit dem Eintreffen der Gläubigen merklich zu und stieg nie über 12°C. Die Temperatur der Wandoberflächen änderte sich während des Heizens kaum. Der Aufenthaltsbereich wird also zu einem beträchtlichen Teil von den Kirchgängern selbst erwärmt, während ein beträchtlicher Teil der Energie, die man zum Heizen aufwendet, ungenutzt unter der Decke „schwebt“, und dort zu allem Überfluss noch Schaden anrichtet.

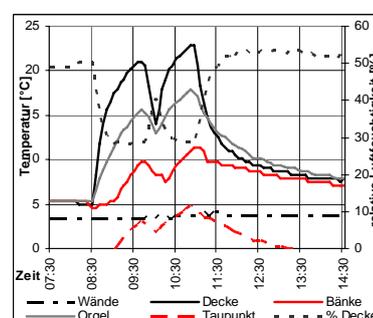


Abbildung 5.50: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen (hier: 26.12.1999) für unterschiedliche Messstellen

Die schnellen, starken Temperaturanstiege hatten entsprechend heftige Einbrüche der relativen Feuchtigkeit unter der Kassettendecke und auf der Empore bei der Orgel zur Folge (von

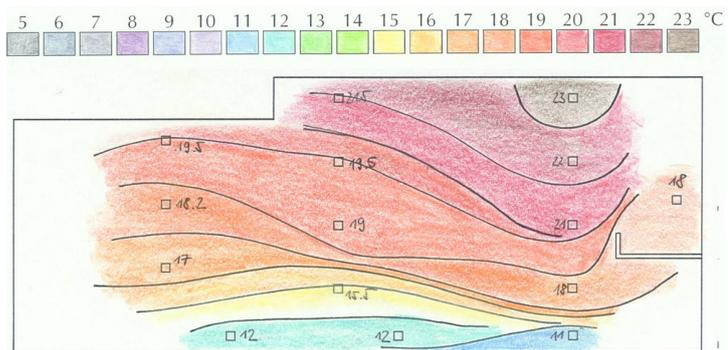


Abbildung 5.51: Temperaturverteilung im Längsschnitt für Sonntag, 26.12.1999



Abbildung 5.52: Pfarrkirche zum Heiligsten Herzen Jesu in Branzoll

50% auf 30% am Beispielsonntag, zum Teil noch extremer (s. Abbildung 5.53), welche mit tatsächlich beobachteten Stimmungsproblemen der Orgel und Rissen in der Decke korrelierten, denn Holz reagiert auf solche Schwankungen, indem es bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit Wasser an die Luft desorbiert, bei hoher dagegen Wasser aus der Luft absorbiert - was mit ständigem Schwinden und Quellen einhergeht.

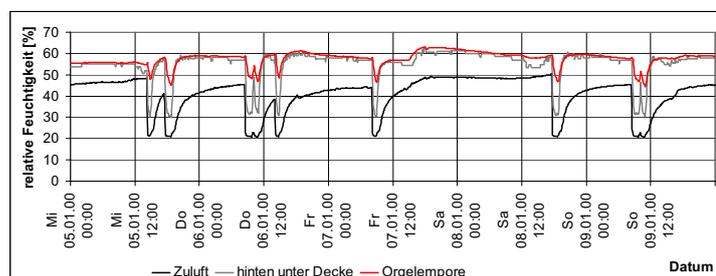


Abbildung 5.53: Verlauf der relativen Feuchtigkeit auf der Orgelempore und unter der Decke

Die niedrige Oberflächentemperatur der Wände, speziell im Sockelbereich, führte zu wiederholtem Unterschreiten des Taupunkts. Das begünstigt die beobachtete Schwärzung und Schäden durch Salze, denn

- an feuchten Stelle Oberflächen bleibt von der Luft aufgewirbelter Staub stärker haften,
- regelmäßig feuchte Wände bilden einen idealen Nährboden für Algen und Pilze und
- Wasser kann in der Wand gespeicherte Salze lösen, die dann in Richtung Oberfläche wandern und entweder auf dieser ausblühen oder knapp unter der Oberfläche kristallisieren, und dabei die oberste Putzschicht lockern und auf Dauer ablösen.

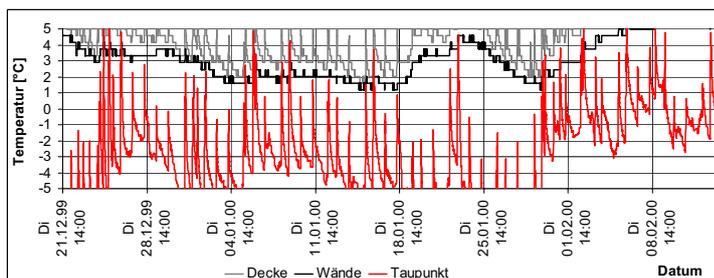


Abbildung 5.54: Oberflächentemperatur an der Nordwand oben und unten im Vergleich zur Taupunkttemperatur der Luft

5.4.2 CFD-Simulation mehrerer Heizungsvarianten für die Pfarrkirche von Branzoll

Die bestehende Situation war weder aus denkmalpflegerischer Sicht vertretbar noch erfüllte sie auch nur moderate Anforderungen an die thermische Behaglichkeit der Gottesdienstbesucher. Die Heizung sollte deshalb im Rahmen einer generellen Restaurierung der Kirche erneuert werden. Der beauftragte Architekt zog zwei Systeme in Betracht: Fußbodenheizung und Bankheizung. Um den Entscheidungsprozess zu unterstützen, wurden beide Systeme mit CFD simuliert, und zwar jeweils in mehreren Varianten (siehe Tabelle 5.5). Für das geometrische und physikalische Modell sowie die Parameter und Randbedingungen der Simulation vgl. Abschnitt 5.1.9.

Bei der Simulation standen drei sich aus den Messungen ergebende Fragen im Mittelpunkt:

1. Welches vertikale Temperaturprofil stellt sich ein?
2. Welche relative Luftfeuchtigkeit ist zu erwarten?
3. Wie entwickeln sich die Oberflächentemperaturen?

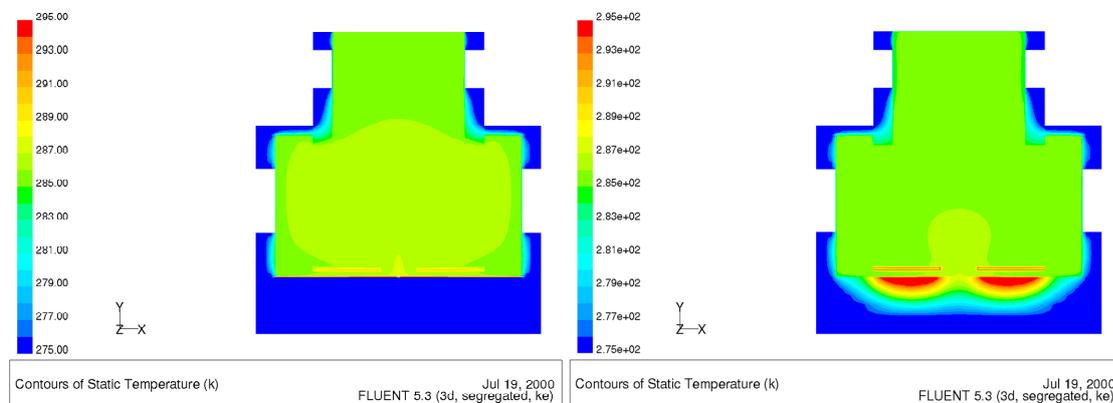


Abbildung 5.55: Temperaturverteilung in der Querschnittsebene (Temperaturangaben in Kelvin): links für FH-A, rechts für BH-A

Werden Fußbodenheizung und Bankheizung stationär betrieben, ergibt sich für beide Fälle eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung (Abbildung 5.55): Die Lufttemperatur im oberen Teil der Kirche liegt nur etwa 1 K unter der Temperatur im Aufenthaltsbereich. Die Höhe der mittleren Temperatur hängt im Wesentlichen nicht vom Heizungssystem ab, sondern vor allem von der in den Raum eingebrachten Energiemenge. Bei größerer Heizleistung ist die Verteilung ähnlich, das Temperaturniveau aber deutlich höher, wie das Ergebnis für Variante FH-C (100W/m^2) in Abbildung 5.56 erkennen lässt.

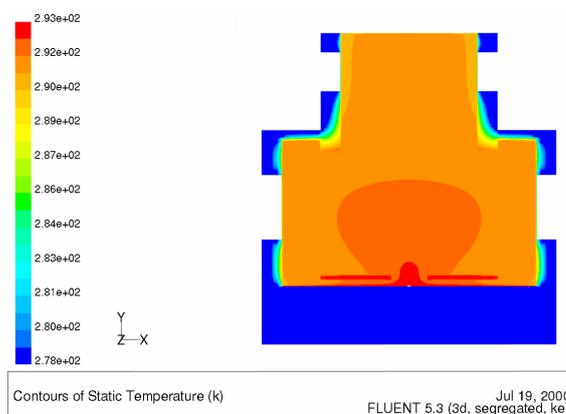


Abbildung 5.56: Temperaturverteilung in der Querschnittsebene (Temperaturangaben in Kelvin) für FH-C

Unterschiede zwischen den beiden Heizungssystemen zeigen sich jedoch, wenn man den Aufenthaltsbereich betrachtet (Abbildung 5.57):

- Fußbodenheizung:
 Bei der gegebenen Höhe der Kirche und im Besonderen unter den kalten Fenstern kann die Bodenheizung den kalten, an der Wand abfallenden Luftstrom nicht vollständig auffangen. Die Luft erwärmt sich jedoch wieder, bevor sie den Aufenthaltsbereich erreicht.
- Bankheizung:
 Im Fall der auf den Bankbereich beschränkten Heizung wird die an den Wänden abfallende und in den Aufenthaltsbereich strömende Luft erst dort erwärmt. Die äußeren (wandnahen) Sitzplätze sind deutlich kälter, im Fußbereich zieht es.

Hinzu kommt, dass beim realen, nicht stationären Betrieb der Bankheizung sowohl die Luft als vor allem auch die Oberflächen kälter sind als im gerechneten Beispiel. Dementsprechend stärker sind der Kaltluftabfall an der Wand und der Luftzug im Bankbereich.

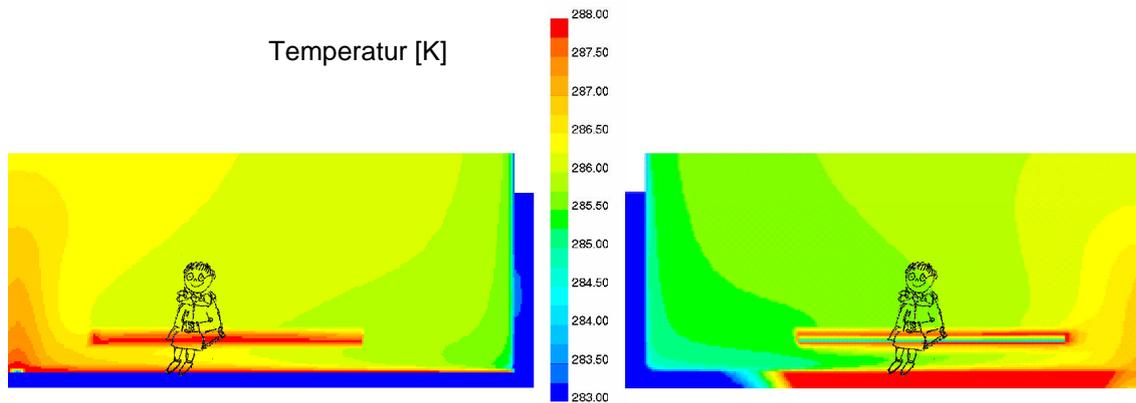


Abbildung 5.57: Temperaturverteilung im Aufenthaltsbereich für die Varianten FH-A (links) und BH-A (rechts)

Wie die Temperaturverteilung ist auch das Strömungsbild bei stationärem Betrieb beider betrachteter Heizungssysteme sehr ähnlich: Abbildung 5.58 zeigt von der Kirchenmitte ausgehende, nach der Temperatur eingefärbte Stromfäden, links für die Fußbodenheizung, rechts für die Bankheizung. Die Luft steigt in der Mitte des Kirchenschiffs auf, kühlt an den Oberflächen ab und sinkt entlang der Wand ab. Und auch hier wird deutlich: Während die Luft im Fall der Fußbodenheizung schon vor Erreichen des Bankbereichs wieder erwärmt wird, strömt bei der Bankheizung die kalte Luft in den Fußbereich und wird erst dort erwärmt.

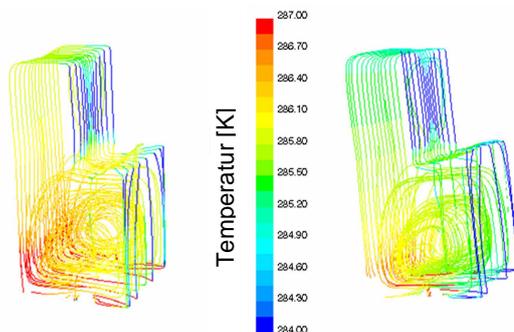


Abbildung 5.58: Stromlinien für die Varianten (a) FH-A und (b) BH-A

Die absolute Feuchtigkeit während der Messungen im Winter 1999/2000 schwankte außen zwischen 1 und 5 g/m³, im Innenraum zwischen 2.5 und 4.5 g/m³ mit regelmäßigen Spitzen zwischen 5 und 6 g/m³ während der Gottesdienste. Für die Beurteilung der sich einstellenden relativen Feuchtigkeit wird deshalb aus der Temperaturverteilung unter Zugrundelegen einer angenommenen absoluten Feuchtigkeit von (i) 3 g/m³ und (ii) 6 g/m³ die Verteilung der relativen Feuchtigkeit berechnet, ohne sie im eigentlichen Sinn mit simuliert zu haben.

Abbildung 5.59 zeigt, dass die beobachteten Einbrüche der relativen Feuchtigkeit unter der Decke dank der gleichmäßigen Temperaturverteilung nicht mehr auftreten. Allerdings ist die zu erwartende relative Feuchtigkeit insgesamt eher niedrig: Bei Varianten FH-A liegt sie für 3 g/m^3 bei 25%, für 6 g/m^3 bei 50%. Ähnliche Ergebnisse erzielt die Bankheizung in Variante A. Die höhere Lufttemperatur von Variante FH-C führt gar zu Werten der relativen Feuchtigkeit unter 20% resp. 35%.

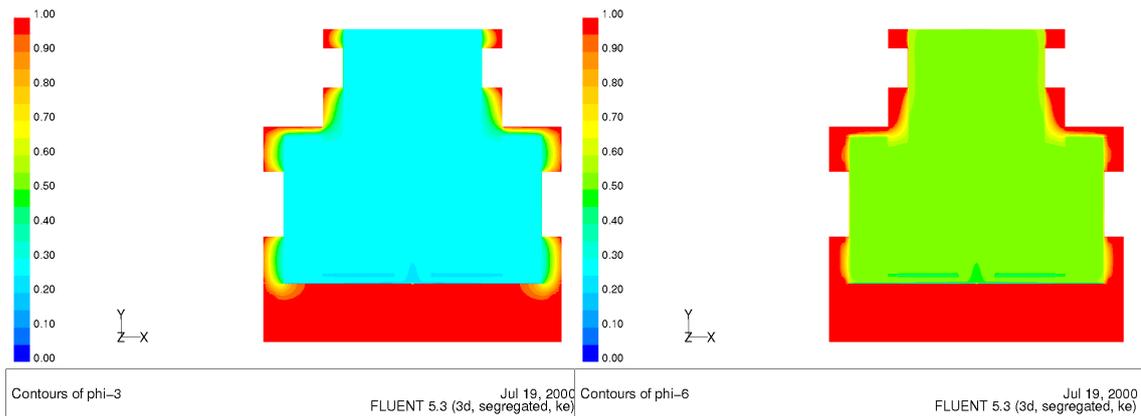


Abbildung 5.59: Verteilung der relativen Feuchtigkeit in der Querschnittsebene für FH-A, berechnet aus der Verteilung der Lufttemperatur für (a) 3 g/m^3 und (b) 6 g/m^3

Bei der Betrachtung der Oberflächentemperaturen (Abbildung 5.60) fällt auf, wie schnell die Temperatur des Fußbodens im Fall der Bankheizung zur Wand hin abnimmt: von 20°C auf etwa $5\text{--}6^\circ\text{C}$. Entsprechend niedrig ist auch die Temperatur der Wand im Sockelbereich, vor allem wenn man bedenkt, dass die Temperaturen im instationären Betrieb noch deutlich niedriger sein werden. Der Fußbodenheizung gelingt es, mit erreichten Temperaturen von 8°C die hier sonst, gerade im Frühjahr, typischen Kondensationsprobleme zu vermeiden: Der Taupunkt für 6 g/m^3 liegt mit etwa 3°C deutlich niedriger.

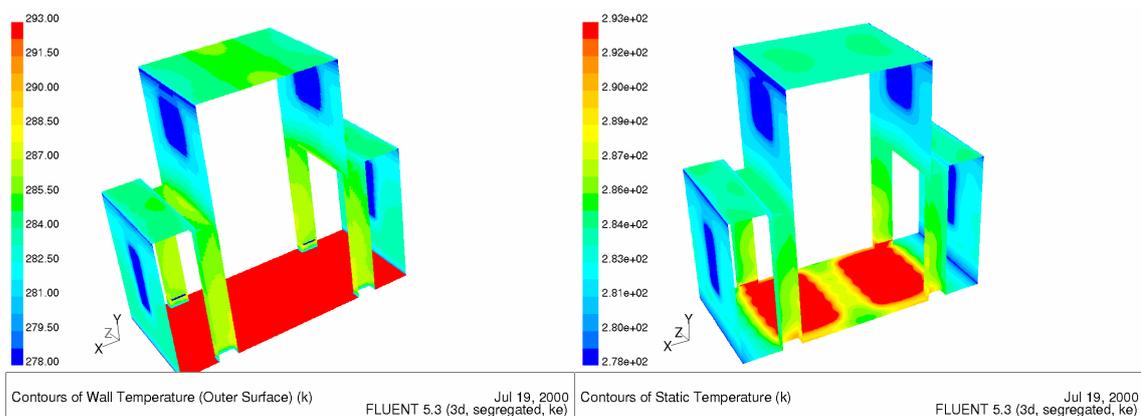


Abbildung 5.60: Oberflächentemperatur für (a) FH-A und (b) BH-A

Die Temperatur der Wandflächen nimmt nach oben hin immer weiter ab. Besonders ausgeprägt ist dies bei der Fußbodenheizung erkennbar, aber auch bei der Bankheizung ist die Wand knapp unter der Decke am kältesten. Die größere Heizleistung in Variante FH-C führt erwartungsgemäß auch zu höheren Oberflächentemperaturen, diese nehmen allerdings nicht im gleichen Maß wie die Lufttemperatur zu: Während diese im Mittel um 6 K steigt, tun es die Oberflächen nur um 4.5–5.5 K.

Mit Hilfe der zugrunde gelegten 6 g/m^3 wurde die Kondensationsgefahr an der Oberfläche abgeschätzt, indem die relative Feuchtigkeit in der jeweils wandnächsten Zelle berechnet wurde (Abbildung 5.61). Bei stationärer Heizung kommt es vor allem im Bereich der einfach verglasten Fenster zu Kondensation, diese wirken dadurch bei langsamen Änderungen als „Vorentfeuchter“. Bei verstärkter Heizleistung in Wandnähe (Variante FH-B) verbessert sich die Situation durch die höhere Temperatur der Wände noch etwas.

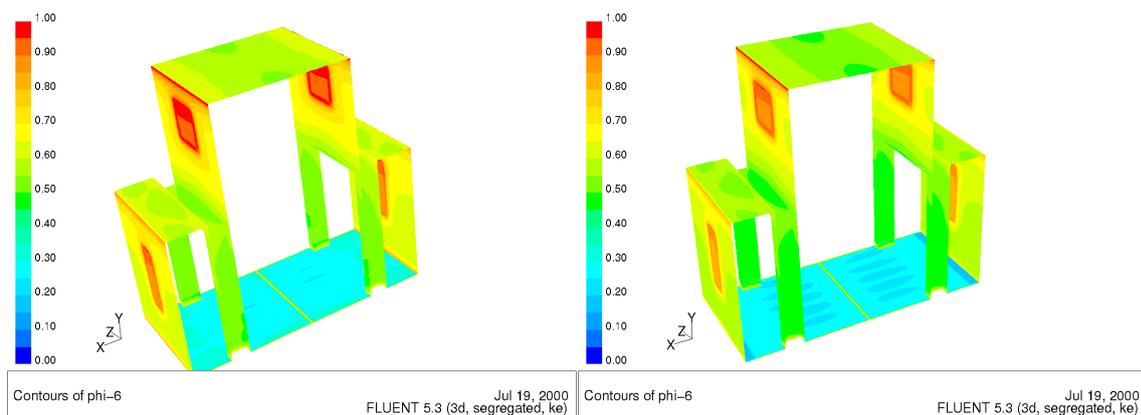


Abbildung 5.61: Relative Feuchtigkeit in der wandnächsten Zelle, berechnet für 6 g/m^3 für die Varianten (a) FH-A und (b) FH-B

Als Ergebnis der Simulation wurde eine Fußbodenheizung mit verstärkter Heizleistung in Wandnähe empfohlen.

5.4.3 Raumklima nach Einbau der neuen Heizung in der Pfarrkirche von Branzoll

Die Ergebnisse und Empfehlungen wurden mit den Entscheidungsträgern der Pfarrei und dem ausführenden Architekten besprochen. Im Sommer 2001 wurde im Zuge einer allgemeinen Restaurierung eine Fußbodenheizung eingebaut.

Nach Abschluss der Renovierungsarbeiten wurde das Raum-

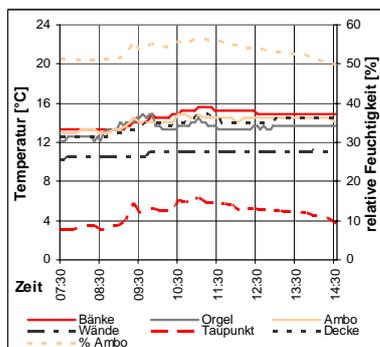


Abbildung 5.62: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen (hier: 10.2.2002) für unterschiedliche Messstellen

klima vom 08.02.2002 bis 08.03.2002 erneut aufgenommen, um das Ergebnis zu prüfen. Die Sensorverteilung entsprach derjenigen der ersten Messung.

Der Temperaturverlauf für einen typischen Sonntagmorgen, in Abbildung 5.62 dargestellt, zeigt, dass die Temperaturverteilung wesentlich ausgeglichener ist: Am wärmsten ist es im Bankbereich, mit der Höhe nimmt die Temperatur leicht ab, aber die Differenz zwischen Bankbereich und Orgelempore bzw. Messstelle unter der Decke beträgt nur etwa 1 K, nie mehr als 2 K. Im Laufe des Tages steigt die Temperatur, auch durch die Kirchenbesucher von etwa 13°C auf etwa 15°C an. Die Wandtemperatur liegt über 10°C, und damit weit genug vom Taupunkt entfernt. Die relative Feuchtigkeit liegt mit 50% im gewünschten Bereich und nimmt während des Gottesdienstes leicht zu.

Die Ergebnissen zeigen, dass mit dem neuen Heizungssystem sowohl die denkmalpflegerischen Problembereiche (Einbrüche des relativen Feuchtigkeit bei Kassettendecke und Orgel, Kondensation an den Oberflächen) als auch die Behaglichkeit im Aufenthaltsbereich verbessert werden konnten. Außerdem bestätigen die Messwerte die Ergebnisse der Simulationsrechnung.

5.5 Bewertung der CFD-Simulation als Werkzeug in der Denkmalpflege

Im untersuchten Fallbeispiel hat sich die CFD-Simulation als erfolgreiches und innovatives Werkzeug in der Denkmalpflege bewährt. Dennoch muss auf jeden Fall betont werden, dass die Genauigkeit der Ergebnisse einer CFD-Simulation

1. von der Qualität des geometrischen Modells und des Gitternetzes sowie
2. von der Genauigkeit der eingegebenen Materialeigenschaften und Randbedingungen

abhängen. Diese Informationen stehen für alte Gebäude kaum jemals zur Verfügung. Wohl auch deshalb ist CFD als Hilfsmittel für die Entscheidungsfindung in der Denkmalpflege noch nicht so weit entwickelt wie im übrigen Hochbau. Diese Informationslücken können über gut überlegte Näherungen, einige ausgewählte Materialanalysen und die Validierung des Modells mit Raumklimamessungen des Zustandes vor dem Eingriff geschlossen werden.

Eingriffe in denkmalpflegerisch wertvollen Objekten sind für den Einsatz von CFD prädestiniert: Die Gebäude haben selten Standardmaße, die Nutzung ist meist untypisch und die Anforderungen der Denkmalpflege schränken den Planer weiter ein. Dementsprechend können auch keine Standardlösungen angewandt werden, sondern es muss für jeden Fall eine fallangepasste, neue Lösung gefunden werden.

Schlussendlich erleichtert CFD die Anwendung von Forschungsergebnissen zu raumklimatisch mit verursachten Schadensprozessen. Ebenso wie das Kondensationsrisiko aus den Oberflächentemperaturen berechnet wurde, können weitere, auch komplexere Prozesse, deren mathematischer Zusammenhang bekannt ist, betrachtet werden. Zum Beispiel ist es möglich, die Gleichungen für Staubablagerungsraten zu integrieren, um das Schwärzungsrisiko zu bewerten [Lengweiler, 2000], oder chemische Expertenmodelle anzuwenden, um das Risiko für Salzschäden abzuschätzen [Price, 2000]. Das Wissen, das in den letzten Jahren mit internationalem Einsatz zu denkmalrelevanten Schadens-, aber auch Erhaltungsmechanismen generiert wurde, wird mit Hilfe des technologischen Werkzeugs CFD nutzbar für den Erhalt unseres kulturellen Erbes.

6. Diskussion und Schlussfolgerung

6.1 Vergleich der Ergebnisse mit in der Literatur dokumentierten Fallbeispielen

6.1.1 Luftheizungen

Die im Rahmen dieser Arbeit analysierten, mit Luftheizung temperierten Kirchen zeigen ein sehr breites Spektrum - einerseits an realisierte Anlagen- und Betriebsvarianten, andererseits an resultierenden raumklimatischen Situationen:

- Sie reichen von der mit 60°C warmer Zuluft nur für die Gottesdienste beheizten Kirche, in der sich die warme Luft unter der Decke und bei der Orgel staut - wo die relative Feuchtigkeit entsprechend einbricht - und gleichzeitig die Wände so kalt bleiben, dass es im Sockelbereich zu Kondensation kommt, während den Aufenthaltsbereich erst die Gottesdienstbesucher nennenswert erwärmen (z.B. Branzoll, Anhang C.1.3, Vilpian, Anhang C.1.28, Laag, Anhang C.1.11, Karneid, Anhang C.1.9)
- bis zu stationär beheizten oder grundtemperierten Kirchen, die durchaus annehmbare Ergebnisse erzielen (z.B. St. Martin in Gsies, Anhang C.1.19, Gais während des Grundheizens, Anhang C.1.7, St. Martin in Thurn, wäre da der Feuchteschaden im Kanal nicht gewesen, Anhang C.1.20)

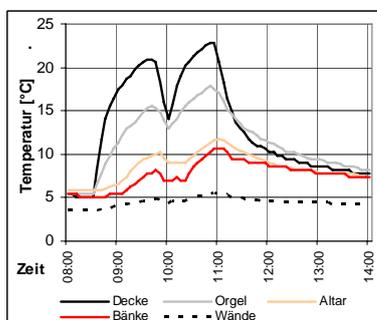


Abbildung 6.1: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit instationärer Luftheizung

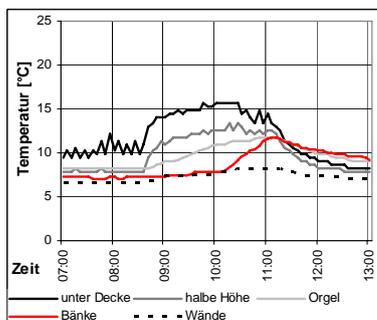


Abbildung 6.2: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Luftheizung und Grundtemperierung

In Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 wurden typische Temperaturverläufe dargestellt, die in Abschnitt 4.3 mit anderen Heizungstypen verglichen wurden. Die instationär betriebenen Luftheizungen wurden als die grundsätzlich schadensträchtigsten ermittelt, sowohl was das sich einstellende Temperaturprofil und den Einbruch relativer Feuchte, als auch was das Kondensationsrisiko betrifft. Aber auch innerhalb der Kategorie „Luftheizung“ konnten beträchtliche Unterschiede festgestellt werden (Abschnitt 4.4): Am schlechtesten schneiden durchwegs die Kirchen mit Wandauslass und jene mit kurzer Vorheizzeit ab.

Arendt [1993] berichtet in seiner Arbeit, dass der viel zitierte große Temperaturunterschied zwischen Aufenthaltsbereich und Decke von ihm nicht bestätigt werden könne: Die vertikale Zunahme der Raumlufttemperatur betrug im Mittel nur weniger als 1.5 K über die gesamte Raumhöhe (lediglich im Lübecker Dom wurde eine Temperaturzunahme von 3 K in 20m Höhe gemessen). Dass das Temperaturprofil bei Luftheizung nicht zwangsläufig groß sein muss, bestätigen auch

die hier vorgestellten Messungen. Völlige „Entwarnung“ kann aber nicht gegeben werden: Die beobachtete Temperaturschichtung erreichte in einigen Fällen 15 K und mehr.

Auch in zwei der von Schellen [2002] beschriebenen Fallbeispiele mit Luftheizung kam es beim Heizen zu einer großen Temperaturdifferenz im Raum:

In der Wallonischen Kirche in Delft stieg die Temperatur auf Höhe der Orgelempore beim Heizen für die Gottesdienste von 15°C auf 30–35°C, mit Einbrüchen der relativen Feuchtigkeit von knapp 60% auf 20-25%. Schellen konnte zeigen, dass die Reduzierung der Zulufttemperatur von 70°C auf 40°C, bei gleichzeitiger Erhöhung der Zuluftgeschwindigkeit von 2.4 m/s auf 4.1 m/s - und damit verbunden die Reduzierung der Archimedes-Zahl (Ar) von 0.29 auf 0.05 - die Temperaturverteilung deutlich homogener wird und die Temperaturdifferenz über der Höhe des Raumes von 15 K auf 2 K sinkt.

In St. Liudina's Basilika in Schiedam erzeugte eine relativ neue Luftheizung (70°C, 2m/s, Ar=0.4) auch ein beträchtliches Temperaturprofil von über 5 K. Die alleinige Reduzierung der Ar-Zahl auf 0.07 durch Änderung der Zuluftparameter (<45°C, 4-5 m/s) führte bei der ungünstigen Verteilung von einem zentralen Zuluftgitter und ca. 25 im Boden entlang der Außenmauer verteilten Abluftgittern zu Zegerscheinung im Aufenthaltsbereich (>0.3 m/s). Das Vertauschen von Zuluft- und Abluftgittern führte schließlich zur gewünschten Reduzierung des Temperaturprofils auf unter 2 K.

Schellen [2002] unterstreicht, dass für eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Raum die Anzahl der Lufteinlässe bestimmend ist, die Anzahl und Lage der Abluftgitter hingegen zweitrangig. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung kann auch nur bei einer Archimedes-Zahl unter 0.05 erreicht werden (siehe auch Abschnitt 2.3.6 und Anhang A.4).

Die ebenfalls von Schellen [2002] vorgestellte Sype Kirche in Loodsrecht, bei der die Luftheizung (40°C, 4 m/s, Zuluft über zwei Auslässe im Chor) von einer Fußbodenheizung (konstante Oberflächentemperatur von 18°C) unterstützt wird, zeigt hingegen ein durchaus zufriedenstellendes Verhalten: Grundtemperatur von 10°C, Aufheizrampe von 2 K/h, Temperaturprofil kleiner 2 K. Einzig dem Sinken der relativen Feuchtigkeit unter 40% sollte noch durch eine Gottesdiensttemperatur von 20°C auf 18°C an kalten Tagen und eine entsprechende hygrostatische Regelung entgegengewirkt werden, empfiehlt der Autor.

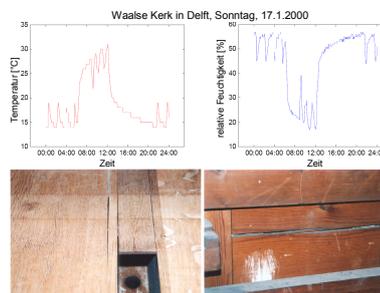


Abbildung 6.3: Temperaturspitzen und Einbruch der relativen Feuchtigkeit beim Heizen in der Wallonischen Kirche in Delft (auf der Höhe der Orgelempore) verursachen beträchtliche Schwindsschäden an der Orgel, aus [Schellen, 2002]

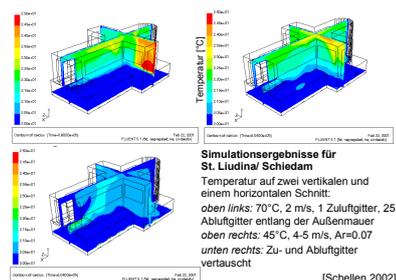


Abbildung 6.4: Die Simulation verschiedener Varianten für die Luftheizung in St. Liudina/Schiedam führt zu einer Verringerung der Temperaturschichtung mit vertretbarem baulichem Aufwand, aus [Schellen, 2002]

Generell fällt auf, dass die Temperaturen im Vergleich zu den von Schellen [2002], aber auch zu vielen von [Arendt, 1993] und [Künzel u. Holz, 1992] beschriebenen Fällen in Südtiroler Kirchen tendenziell niedriger sind.

Baumann u. a. [1998] beobachteten in der Kathedrale von Chur drei unterschiedliche Schwankungszyklen: (i) die saisonale Schwankung der relativen Feuchtigkeit zwischen 60–65% im Sommer und 35–40% im Winter, die als solche der Beheizung der Kirche zuzuschreiben ist, (ii) durch Wetterwechsel verursachte Schwankungen von 1–3°C bzw. 5–15% über mehrere Tage bis Wochen (etwa 60–80 Ereignisse mit $\Delta RH > 10\%$ pro Jahr) und (iii) Tagesschwankungen beim Heizen (160 Ereignisse im Jahr). Es zeigte sich, dass die beim Heizen entstehenden Temperaturspitzen von 25°C im Altarhausgewölbe (7–8 K Differenz über Höhe) und entsprechende Einbrüche der relativen Feuchtigkeit um 15% durch eine Reduzierung der Zulufttemperatur von 48°C auf 28°C deutlich vermindert werden konnten (nur mehr 1–2 K Temperaturdifferenz und 5% Feuchteinbruch) sowie eine leichte Versetzung des Zuluftauslasses vom Altarraum in Richtung Presbyterium der Rückstau im Altarhausbogen vermieden wurde. Der Betrieb mit reduzierter Leistung führte zu einer um 1–2 K abgesenkten Durchschnittstemperatur, mit etwa 5% höheren Winterwerten der relativen Feuchte in Folge. Unbeeinflusst bleiben die wetterbedingten Luftfeuchteschwankungen.

Wetterbedingte Einflüsse sind auch in einer Reihe von Südtiroler Kirchen gut zu beobachten, wenn auch nicht jede Kirche gleich ausgeprägt darauf reagiert. Gut beobachten kann man z.B. den Einfluss der Sonne auf den Klocker-Altar in der Franziskanerkirche in Bozen, wo die Sonne, ganz ähnlich wie die Heizung, die Luft um 2 K erwärmt (Abbildung C.4), ebenso wie den Einfluss der Außentemperatur in der evangelischen Kirche in Bozen (Abbildung C.3) und im Dom zu Brixen (Abbildung C.8). Auch Künzel u. Holz [1992] weisen am Beispiel der Frauenkirche in Nürnberg, in welcher die Schädigung von Holz und Malschichten am Tucheraltar fälschlicherweise pauschal der Heizung zugeschrieben worden waren, auf die Gefahr hin, die von direkter Sonneneinstrahlung (oder auch leistungsstarker Beleuchtung) auf hölzerne Einrichtung und Skulpturen ausgeht. Die ausgelösten Temperaturschwankungen an der Objekt Oberfläche können deutlich über jenen der Raumluft liegen. Ähnliches berichtet Arendt [1993] für den Hochaltar im Münster Ingolstadt.

Auch was die saisonale Schwankung der relativen Feuchtigkeit angeht, haben die Untersuchungen von Künzel u. Holz [1992] und Arendt [1993] klare Ergebnisse gebracht: Durch die konstant niedrige relative Feuchte beim durchgehenden Heizen und die damit einhergehende Desorption von Feuchtigkeit aus hygroskopischen Materialien (erkennbar an der über jener der Außenluft liegenden absoluten Feuchtigkeit) sinkt die mittlere relative Feuchtigkeit über der Heizperiode weit stärker ab als in nur kurzfristig höher beheizten Kirchen, wo die in beide Richtungen verlaufenden Sorptionsprozesse den Trocknungsprozess mindern.

Künzel u. Holz [1992] bringen auch mehrere eindrucksvolle Beispiele von Frühjahrscondensation: In der nicht beheizten Kirche Urschalling/Prien liegt der Taupunkt im Frühjahr mit etwa 2°C recht knapp unter der Temperatur der Wandoberfläche von 3–3.5°C. Mit Öffnen der Türen (um Wärme „hereinzubringen“, denn draußen herrschen 10–15°C, innen 3–4°C) steigt die Feuchtigkeit im Raum drastisch an, und es kommt zur Kondensation. Auch in der (ebenfalls nicht beheizten) Kirche Moosberg bei Landshut in Niederbayern kommt es besonders im Frühjahr, aber auch im Frühsommer, wiederholt zu Kondensation.

Dass aber auch mit Heizung Kondensationsgefahr besteht, wenn diese die Raumhülle nicht genügend erwärmt und zusätzlich Feuchte eingetragen wird, zeigen mehrere Südtiroler Beispiele: In der Pfarrkirche von Branzoll (Abschnitt 5.4.1 und Anhang C.1.3) kommt es während der Gottesdienste regelmäßig zu Kondensation im kalten Sockelbereich. In der Pfarrkirche von Gais (Anhang C.1.7) ist aus dem Verlauf der Taupunkttemperatur zu erkennen, dass die absolute Feuchtigkeit im Raum schon mit Einschalten der Heizung und vor Eintreffen der Kirchgänger steigt - entsprechendes Kondensationsrisiko an den kalten Oberflächen ist die Folge. Besonders eindrucksvoll belegen Feuchtflecken und Salzausblühungen in der Pfarrkirche von Pufels (Anhang C.1.17) das Problem kalter Wände (um den Gefrierpunkt).

Welche Prozesse Heizungen - und da es in den zitierten Fällen Luftheizungen sind, wird dies hier eingereiht - in Zusammenhang mit Salzen auslösen können, zeigen die folgenden drei Beispiele:

Im Zürcher Großmünster, dessen Temperatur ganzjährig um $20 \pm 2^\circ\text{C}$ liegt, pendelt die relative Feuchtigkeit zwischen 75% im Sommer und 40% im Winter. Wie Zehnder u. a. [1986] berichten, beginnt mit dem Absinken der relativen Feuchtig-

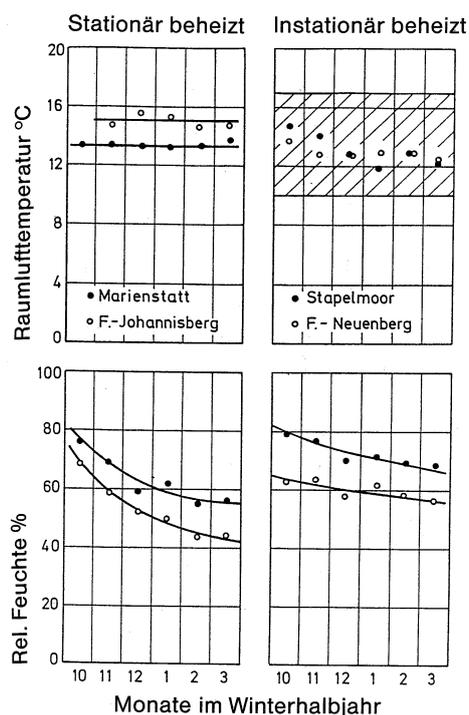


Abbildung 6.5: Eine Reihe vom Fraunhofer IBP untersuchter Kirchen zeigt deutlich die Tendenz, dass die relative Feuchte in stationär beheizten Kirchen im Laufe der Heizsaison stärker sinkt, Abbildung nach [Künzel u. Holz, 1992; Arendt, 1993]



Abbildung 6.6: Salzausblühungen und abblätternde Malschicht im Sockelbereich der Pfarrkirche von Branzoll

keit im Raum unter 50% der Ausblühungszyklus: Zuerst bilden sich feine Rasen von Nitronatrit, bei starkem Wachstum entstehen innerhalb von Tagen millimeterlange Kristallnadeln und knapp unter der Oberfläche wachsende Kristalle verursachen ein intensives Absplittern und Absanden. Nach der zwei bis drei Monate dauernden starken Ausblühungsphase werden frische Ausblühungen spärlicher. Wenn ab April die relative Luftfeuchte wieder ansteigt, bilden sich nur mehr unter der Oberfläche neue Kristalle. Bis Juli „schmelzen“ die Kristalle zu gedrunghenen Körnern zusammen. Schließlich verschwinden die Ausblühungen im Juli, wenn die relative Feuchte wieder über 60% sinkt - indem sie gelöst und dabei von der Mauer wieder aufgenommen werden oder als lockere Relikte zu Boden fallen. Mit der nächsten Heizperiode setzt ein neuer Kristallisationszyklus ein.

Ähnlich zeigen Arnold u. a. [1996] für die Klosterkirche in Müstair, dass es so lange jeden Winter zu Salzausblühungen kam, als die relative Feuchte, bedingt durch die Heizung, unter 60% sank. Seit Ende der 1980er Jahre die Heizung reduziert oder ganz ausgeschaltet wurde, und damit verbunden die relative Feuchtigkeit ganzjährig zwischen 60 und 75% schwankt, treten im Winter keine nennenswerten Nitronatrit-Ausblühungen mehr auf.

Tennikat u. a. [1995] berichten, dass Putz- und Materialteilchen in der Kirche St. Laurentii auf Föhr während der Wintergottesdienste regelrecht vom Gewölbe „rieseln“, teilweise sogar handtellergroße Putzschollen herabfallen. Ausgelöst wird der Prozess durch die Kirchenheizung, die während der Wintermonate zu den Gottesdiensten die Temperatur von 8–9°C auf 19–20°C anhebt, wodurch die relative Feuchtigkeit jeweils von 65–70% auf 35–40% absinkt und zu einer massiven Kristallisation von Natriumchlorid im Porenraum des Putzes oder Ziegels führt.

Dass Salze und ihr regelmäßiges Ausblühen mit der wechselnden Luftfeuchte auch in Südtiroler Kirchen ein durchaus reales Problem sind, wurde am Beispiel des hygroskopischen Salzsystems Thenardid/Mirabilit in Abschnitt 4.5.6 gezeigt.

6.1.2 Fußbodenheizungen

In Kirchen mit Fußbodenheizung wurden im Rahmen dieser Untersuchung grundsätzlich relativ hohe Temperaturen beobachtet: Von den fünf bei der Basisdatenerhebung besuchten Kirchen wurde nur eine auf weniger als 10°C temperiert, die beiden Kirchen im (winterkalten) Grödental auf 10–12°C, die Ursulinenkirchen im ähnlich kalten Bruneck auf 12–15°C, und

die Pfarrkirche in Neumarkt gar auf über 15°C. Dieser Trend wurde auch bei den Raumklimamessungen bestätigt - mit 12–15°C für Terlan und Branzoll, sowie gut 15°C in Tschengels, sowie über einen längeren Zeitraum gemessenen 15°C in Neumarkt.

In allen Fällen wurde die Heizung durchgehend betrieben, evtl. die Temperatur für die Gottesdienste ein wenig angehoben (nicht mehr als 2 K). Dass dies der typische Betrieb für Fußbodenheizungen ist, bestätigt auch Camuffo [2007], nicht zuletzt deshalb, weil die Heizleistung, die über den Boden in den Raum eingebracht werden kann, beschränkt ist, und damit keine schnellen Aufheizvorgänge erlaubt. Insbesondere Schellen [2002] streicht heraus, dass bei der Beheizung von Kirchen (i) der wärmeabgebenden Fußbodenfläche ein wesentlich größeres zu temperierendes Volumen gegenübersteht als in Wohngebäuden und (ii) Wände, Gewölbe und Boden nicht isoliert sind, was, nach seiner Einschätzung, dazu führt, dass über den Boden nicht genügend Wärmeleistung zur Verfügung gestellt werden kann - wobei die typische Temperatur in den Niederlanden über den in dieser Untersuchung beobachteten liegt. Wird die Temperatur der Oberfläche zu hoch geregelt, um die Leistung zu erhöhen, entstehen beträchtliche Auftriebsströmungen, die sowohl aus Sicht der Denkmalpflege als auch der Behaglichkeit zu vermeiden sind.

Bei Fußbodenheizungen ist es in der Regel im Aufenthaltsbereich am wärmsten und die Temperatur der Luft und auch der Oberflächen nimmt mit steigender Höhe leicht ab, wie die hier untersuchten Kirchen zeigen und auch Arendt [1993] durch Messungen bestätigt. Sowohl Arendt [1993] als auch Schellen [2002] zitieren Beispiele, in denen kalte Oberflächen im Gewölbe, zusammen mit der von der Fußbodenheizung verursachten Auftriebsströmung und den am warmen Boden trocknenden und leicht flüchtigen Staubpartikeln, zu erheblichen Schwärzungen führten. [Schellen, 2002]. In der St. Martinus Kirche in Weert machte Schellen [2002] die rußenden Kerzen als primäre Partikelquelle ausfindig, und empfahl außerdem eine Reduzierung der Raumtemperatur von 20°C auf 15°C, um die Auftriebsströmung zu reduzieren, sowie die Isolierung des Gewölbes, um dessen Temperatur zu heben. In St. Gerlachus in Houthem zeigte die Schwärzung an der Decke das Muster der hölzernen Unterkonstruktion als hellere Linien: Durch den niedrigeren Wärmedurchgang im Holz war dort die Oberflächentemperatur höher und die Ablagerung (durch Thermophorese) geringer. Eine zusätzliche Isolierung des Gewölbes würde die Temperatur vergleichmäßigen, außerdem

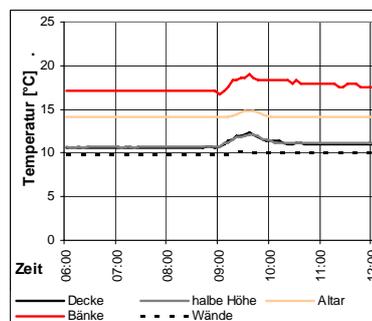


Abbildung 6.7: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Fußbodenheizung



Abbildung 6.8: Qualitativer Vergleich der Verschmutzung eines Glasfaserfilters durch unterschiedliche Kerzen (von links nach rechts) Opfer-Kerze, Altar-Kerze, Opferlicht (klein), Opferlicht (groß), Novene-Kerze, aus [Schellen, 2002]

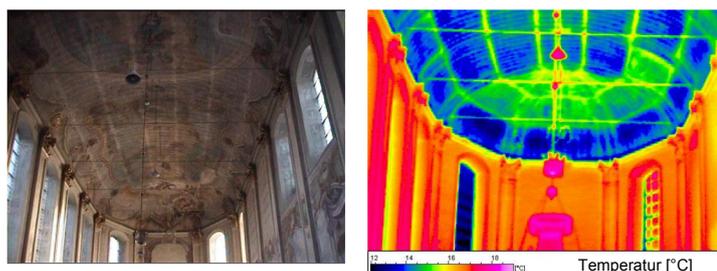


Abbildung 6.9: Photographie (links) und Infrarotaufnahme (rechts) des verschmutzten Gewölbes in St. Gerlachus/Houthem, aus [Schellen, 2002]

könnte die Luftströmung durch Reduzierung der Temperatur an den (zusätzlich zur Fußbodenheizung in der Kirche installierten) Bankheizungen deutlich vermindert werden [Schellen, 2002]. In den untersuchten Südtiroler Kirchen mit Fußbodenheizung wurde keine eklatante Schwärzung festgestellt.

Der durchgehende Betrieb der Heizung vermeidet Temperatur- und Feuchtigkeitssprünge, als Folge der hohen Lufttemperatur wurde aber oft eine konstant niedrige relative Luftfeuchtigkeit beobachtet: Beispielsweise wurden in der Pfarrkirche von Wolkenstein in Gröden 33% (bei knapp 14°C Lufttemperatur innen sowie 6°C und 54% außen) gemessen. Im Nachbardorf St. Ulrich, dessen Pfarrkirche ebenfalls mit Fußbodenheizung temperiert wird, ist die Situation mit 45% (bei 10,5°C innen sowie 6°C und 54% außen) schon wesentlich entspannter.

6.1.3 Bankheizungen

Mit Bankheizung ist es während der Gottesdienste im Aufenthaltsbereich am wärmsten, aber auch die Temperatur der Luft in höheren Gefilden steigt während des Heizens an. Die Temperatur der Wandoberflächen ändert sich nur wenig, und da diese in der Regel recht kalt sind, ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass sie bei zusätzlichem Feuchteeintrag (z.B. durch die Kleidung der Gottesdienstbesucher bei nassem Wetter) unter dem Taupunkt der Luft liegt.

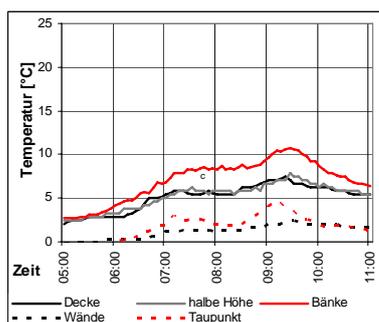


Abbildung 6.10: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen in Kirchen mit Bankheizung

Praktisch alle hier untersuchten Bankheizungen werden instationär betrieben, d.h., die Heizung wird nur für die Gottesdienste aktiviert. Allein in St. Nikolaus/Meran und Lüssen wird auch eine Grundtemperatur von 5°C resp. 4°C gehalten und in St. Pauls läuft die Heizung etwa während der Hälfte der Messzeit (Abbildung C.57). Außerhalb der Heizzeiten ist die Temperatur im Kircheninneren deshalb stark vom Außenklima geprägt und kann durchaus auch unter den Gefrierpunkt sinken (siehe St. Magdalena in Gsies, Anhang C.1.18, oder Prettau, Anhang

C.1.16). Als „typisch“ könnte man Temperaturen zwischen 2 und 6°C bezeichnen. Während der Gottesdienste steigt die Temperatur auf maximal 10-12°C, in Einzelfällen höher (14-16°C in Lüssen und Vals, am Ende des Gottesdienstes).

Diese Temperaturen scheinen, verglichen mit Werten aus der Literatur, nicht besonders hoch zu sein. Olstad u. Haugen [1997] berichten für die Stabkirche von Kaupanger von deutliche höheren Temperaturen im Bankbereich (20°C und mehr), bei Außentemperaturen durchaus auch unter dem Gefrierpunkt. Und auch Grosskinsky u. Riedl [1999] sprechen von einer Tagesmitteltemperatur von 10-12°C in der Pfarrkirche St. Nikolaus in Mühlendorf - bei instationärem Betrieb dürfte das noch einmal deutlich höhere Temperaturen während der Gottesdienste bedeuten (vgl. Vals als Beispiel für hohe Temperatur; Tabelle C.2: (56) mittlere Lufttemperatur 7.9°C, (80) mittlere Temperatur während der Gottesdienste 13.1°C und (78) maximale Temperatur während der Gottesdienste 16.7°C). Die niedrigere Temperatur in Südtiroler Kirchen mag zum einen Teil mit kälteren Außenbedingungen zusammenhängen, liegt zum anderen Teil aber auch daran, dass die Leistung der üblicherweise eingesetzten Heizelemente mit 150–200 Watt je Laufmeter eher gering ist - sie entspricht bei vollbesetzter Kirche in etwa der Heizleistung der Kirchenbesucher selbst. Typische in der Schweiz angewandte Elemente liegen beispielsweise bei 200–400 W/m [Hungerbühler, 1994]. Arendt [1993] spricht bei der Bankheizung von der Kirchenheizung mit der, bezogen auf Fläche und Zeit, stärksten Energieabgabe.

Der Temperaturanstieg außerhalb der Bänke lag in den meisten untersuchten Kirchen bei etwa 2/3 des Anstiegs im Bankbereich. Am geringsten ist der Anstieg mit 2–3 K unter der Decke im Vergleich zu 6–7 K im Bankbereich in der - sehr großen - Pfarrkirche von St. Pauls. Arendt [1993] berichtet, dass er kein „typisches“ Höhenprofil für Bankheizungen feststellen konnte: Von praktisch keinem Einfluss auf das Raumklima bis zu konstanter Temperatur über die gesamte Höhe (wie z.B. in der Studienkirche Dillingen) reichte das Spektrum.

Der Temperaturanstieg auch in größerer Höhe zeigt die durch die Bankheizung induzierte Auftriebsströmung an - mit der ein Nachströmen kalter Luft von den Wandbereichen in den Bankbereich einhergeht (siehe auch Anhang C.1.22). Dieser von den Besuchern als „Zug“ empfundene Luftströmung mit größerer Heizleistung im Bankbereich entgegenzuwirken zu versuchen, bedeutet allerdings, die Strömung noch zu verstärken (z.B. [Schellen, 2002], St. Gerlachus Kirche), ihr mit durchge-

hendem Heizen zur Raumtemperaturanhebung zu begegnen, ist - mit den Worten von Arendt [1986] - „die teuerste und auch schlechteste Art der Dauerheizung“.



Abbildung 6.11: Die Schwärzung in der mit Bankheizung temperierten Kirche in Maria Saal am Ritten/Südtirol zeichnet die Struktur der Deckenkonstruktion nach.

In der Regel wird die Bankheizung tatsächlich nur zur Temperierung des Aufenthaltsbereiches empfohlen (nicht nur von [Camuffo, 2007]), aber eine Reihe von (Fall-)beispiele (z.B. [Sandler, 2008; Grosskinsky u. Riedl, 1999]) zeigen, dass die Bankheizung durchaus auch für die Raumheizung verwendet wird. Die in Südtirol typischerweise installierten Leistungen scheinen dem Anspruch einer Erwärmung des Kirchenraumes aber nicht gerecht zu werden (siehe Abschnitt 4.5.3).

Die Temperatur der Wandoberflächen wird beim typischen instationären Betrieb (aber wie Messungen in St. Magdalena, siehe Abbildung 4.16, und St. Pauls, Abbildung C.55, zeigen auch bei längeren Heizperioden) kaum erhöht. Zusammen mit vorbeiströmender Luft, die - wie Arendt [1993] einprägsam beschreibt - „nun noch belastet [ist] mit der zusätzlichen Feuchte der Nutzer, die bei keinem anderen Heizsystem so zu Buche schlagen wird wie hier, da die Regen- und Schneenässe der Kleidung durch die Bankheizung direkt abgetrocknet wird“, führt deshalb häufig zu Kondensation an den Oberflächen und, damit verbunden, zu stärkerer Verschmutzung. Momente der Kondensationsgefahr konnten auch in den in Südtirol untersuchten Kirchen mit Bankheizung jeweils zu den Gottesdiensten beobachtet werden, ebenso z.T. die damit verbundenen Schäden (z.B. das typische Abbilden des Ziegelwand als unregelmäßige Verschmutzung in der Pfarrkirche von Prettau). Zu gravierender Verschmutzung kam es hingegen vor allem in Lüssen (siehe Anhang C.1.12, S.194), wo es durch die Bankheizung regelmäßig zur Desorption von Feuchte im Bankbereich und deren Kondensation an den Wänden kam. Dass es durch die Bankheizung zu erheblichen Feuchtebewegungen im hölzernen Bankspiegel kommen kann, zeigen ebenso die Messungen in Vals (siehe Abschnitt C.1.27, S.209), und auch Arendt [1976b] hat „Vermorschung“ von Bankspiegeln im Zusammenhang mit Bankheizungen beobachtet.

Ein „verbessertes Bankheizungssystem“ ist auch das Ergebnis des EU-Projektes „Friendly Heating“ (EVK4-CT-2001-00067, geleitet von Dario Camuffo, CNR ISAC in Padova, Informationen u.a. [Camuffo, 2007; Limpens-Neilen, 2006]), das die Entwicklung einer denkmalverträglichen Heizung zum Ziel hatte: möglichst geringe Beeinflussung des Raumklimas bei akzeptabler Behaglichkeit der Besucher. Lokal eingesetzte Nieder-temperatur-Strahlungselemente, welche dank hohen Strahlungs-

anteils effizienter lokale Behaglichkeit erzeugen können als konvektive Systeme waren die Lösung der Wahl. Insgesamt sind drei Elemente vorgesehen: unter der Kniebank, unter der Sitzbank und im Bereich der Hände (Buchablage). Im Vergleich zu den bereits erhältlichen und weit verbreiteten Sitzbank-Heizungssystemen wurde insbesondere auf verbesserte Strahlungsqualität, reduzierte Leistung, integrierte Regelung und optimale Anpassung der Elemente an die physiologischen Bedürfnisse geachtet. Falls aus klimatischen Gründen nötig, wird eine gleichzeitige Entfeuchtung empfohlen. Ein Prototyp des Systems wurde sowohl in einer Klimakammer an der TU Eindhoven untersucht [Limpens-Neilen u. a., 2004b; Schoffelen u. a., 2004] und simuliert [Limpens-Neilen u. a., 2005, 2004a], als auch in der Pfarrkirche von Rocca Pietore in den Dolomiten installiert und unter realen Nutzungsbedingungen vermessen [Bratasz u. a., 2007; Camuffo, 2007].

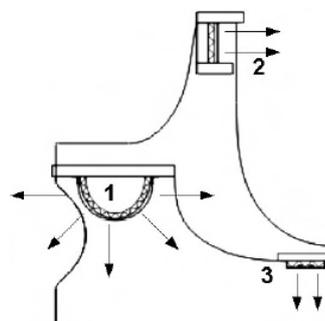


Abbildung 6.12: Positionen der Niedertemperatur-Strahlungselemente bei Friendly Heating, aus [Limpens-Neilen, 2006]

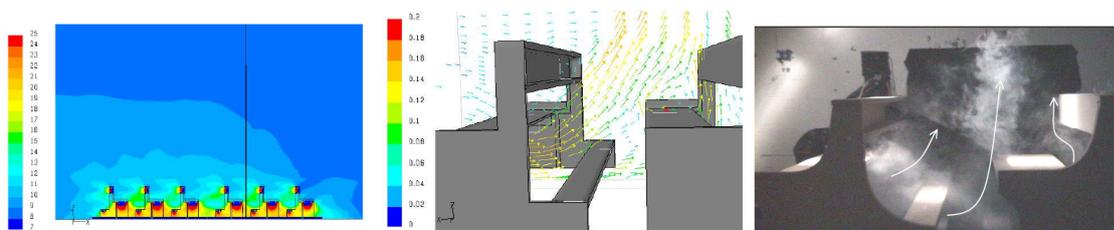


Abbildung 6.13: Simulation der Schwarzkugeltemperatur und der Luftgeschwindigkeit sowie Messung der Raumluftströmung im Bankbereich bei Friendly Heating, aus [Camuffo, 2007; Limpens-Neilen, 2006]

6.1.4 Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte

Da es insbesondere die wiederholten Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchtigkeit sind, die aus Sicht der Denkmalpflege Schäden verursachen, soll zum Vergleich der Messergebnisse auf eine von Dario Camuffo [Camuffo, 2007] im Rahmen eines Europäischen Forschungsprojektes genutzte Darstellungsmethode zurückgegriffen werden: Die täglichen Schwankungen der relativen Feuchtigkeit werden über den täglichen Temperaturschwankungen aufgetragen.

Die schwarzen Ovale in den Abbildungen 6.14 bis 6.16 kennzeichnen die Ergebnisse im oben zitierten Forschungsprojekt, in dessen Rahmen Messungen in einer Kirche in den italienischen Alpen durchgeführt wurden: Während das bestehende Heizungssystem (instationär betriebene Luftheizung mit Luftauslass in etwa 5 m Höhe) große Schwankungen verursacht (rechtes Oval), liegen die Werte für den in der selben Kirche installierten Prototypen der entwickelten verbesserten Bankheizung im linken Oval - und damit, nach Camuffo, in einem Bereich, der die natürlichen Schwankungen nicht übersteigt.

Des Weiteren in den Diagrammen eingetragen sind die Werte der hier untersuchten Südtiroler Kirchen, differenziert nach Heizungstyp (Bankheizungen und Fußbodenheizungen in Abbildung 6.14, stationäre oder grundtemperierte Luftheizungen in Abbildung 6.15 und instationäre Luftheizungen in Abbildung 6.16). Während im Bereich des Hochaltars (jeweils linke Abbildung) die meisten untersuchten Systeme tendenziell im rechten unteren Eck liegen, stehen für den Bereich unter der Decke (mittlere Abbildung) bzw. bei der Orgel (rechte Abbildung) die instationär betriebenen Heizungssysteme sehr wohl links oben heraus. Die extremen Schwankungen von [Camuffo, 2007] werden aber in kaum einer Kirche, am ehesten noch in Vilpian und Laag, erreicht. Die Ausgangssituation der im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes untersuchten Kirche scheint ein echter „worst case“ zu sein.

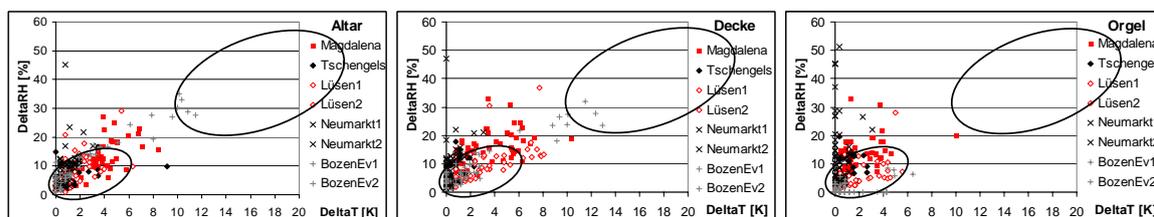


Abbildung 6.14: Tägliche Schwankungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit für die untersuchten Bankheizungen und Fußbodenheizung. Das Oval links unten zeigt zum Vergleich die von „Friendly Heating“ erreichten Werte, das Oval rechts oben die Werte bei Betrieb der Luftheizung in Rocca Pietore

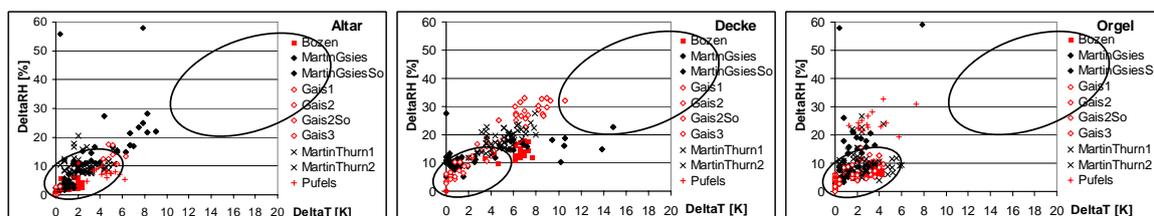


Abbildung 6.15: Tägliche Schwankungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit für die untersuchten stationär betriebenen und grundtemperierten Luftheizungen. Das Oval links unten zeigt zum Vergleich die von „Friendly Heating“ erreichten Werte, das Oval rechts oben die Werte bei Betrieb der Luftheizung in Rocca Pietore

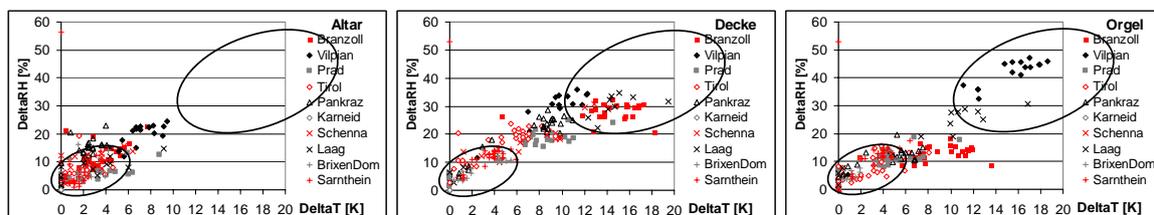


Abbildung 6.16: Tägliche Schwankungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit für die untersuchten instationär betriebenen Luftheizungen. Das Oval links unten zeigt zum Vergleich die von „Friendly Heating“ erreichten Werte, das Oval rechts oben die Werte bei Betrieb der Luftheizung in Rocca Pietore

6.2 Ergänzende Diskussion von in dieser Arbeit nicht direkt untersuchten Heizungssystemen

6.2.1 Wandtemperierung

Da keine Kirche mit „Wandtemperierung“ Gegenstand der in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Untersuchung war, wurde das System bisher in dieser Arbeit auch nicht behandelt. Da die „Wandtemperierung“ jedoch - vor allem in der Praxis, aber auch in der Fachliteratur - heftig diskutiert wird, soll sie hier zumindest erwähnt und mit einigen Verweisen auf die Fachliteratur kurz andiskutiert werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Anwendung des Systems in Kirchen.

Als „Wandtemperierung“ oder „Temperierung“ wird seit Ende der 80er Jahre, ausgehend von der „Landesstelle für nicht-staatliche Museen“ in Bayern ein System propagiert, das über die Temperierung der Umschließungsflächen gleich eine ganze Reihe von Problemen lösen sollte [Arendt u. Hausladen, 1992]: Feuchtprobleme vermeiden, ein musealen Umgebungen zuträgliches Raumklima schaffen und Energie einsparen. Wurden anfangs noch verschiedene Varianten - zum einen mit (doppelter) Vorsatzschale aus Gipskarton vor der Wand, zum anderen mit direkt unter Putz verlegten Heizungsrohren - angeboten [Arendt u. Hausladen, 1992], hat sich später das letztere System ohne zusätzliche Wandverkleidung durchgesetzt [Kotterer u. a., 2004].

Schon Arendt u. Hausladen [1992] setzten sich in ihrem Beitrag sehr kritisch mit dem System auseinander und zeigen vor allem Schwachpunkte aus physikalisch-ingenieurtechnischer Sicht in der Argumentation für das System auf: Z.B. zeigen sie auf, dass sich mit dem Coanda-Effekt (dem Phänomen, dass sich ein strömendes Medium an seine Begrenzungsfläche, in diesem Fall die Wand, anlehnt) zwar ein aufsteigender Warmluftschleier vor der Wand erklären lässt - aber nur bis in beschränkte Höhe. Ganz gewiss wird der Warmluftstrom nicht wieder wandnahe sinken und so, wie in der den Autoren vorliegenden Publikation behauptet, jegliche Luftzirkulation im Raum vermeiden, sondern er wird in den Raum strömen, und umgekehrt im Sockelbereich kältere Luft aus dem Raum nachströmen. Dass der Energieverbrauch 60% niedriger als bei anderen Heizmethoden sei, lassen sie auch nicht gelten, da gerade durch die Erhöhung der Oberflächentemperatur an der Innenseite der Außenwand der Wärmedurchgang durch die Wand steigt - und dieser Effekt weder durch ein trockeneres, und damit besser isolierendes Mauer-

werk, noch durch die dank Flächenheizung niedrigere Raumlufttemperatur für gleiches Behaglichkeitsempfinden aufgewogen wird. Schlussendlich äußern die Autoren sich besonders kritisch in Bezug auf die Propagierung der Wandheizung als optimales System für die Trockenlegung feuchten Mauerwerks. Wirksam sei das System für die Vermeidung von Kondensat, erkaufe den Vorteil unter Umständen aber mit dem Nachteil neu auftretender Salzausblühungen. Man könne auch eine Wand gegebenenfalls durch Beheizen trocken halten - niemals jedoch trocken legen. Der Verdunstungshorizont der aufsteigenden (oder von außen eindringenden) Feuchte werde von der Oberfläche ins Innere der Wand verlegt, dadurch komme es zu neuen Bereichen des Ausblühens ggf. vom Wasser mitgeführter Salze; das ständige Verdampfen von Wasser koste außerdem zusätzliche Energie. Die Autoren plädieren insgesamt für eine realistische Betrachtung der Vorteile und Nachteile des Systems und den gezielten Einsatz in als geeignet befundenen Fällen. Kirchen - und andere Räume, deren Höhe die eines Wohnraums um ein Mehrfaches überschreiten - gehören, aus Sicht der Autoren, wahrscheinlich nicht dazu.

Die mittlerweile veröffentlichten Erfahrungen und Messungen an einer Reihe von Objekten helfen, diese tatsächlichen Vorteile, aber auch Grenzen, des Systems „Wandtemperierung“ zu bewerten und zu entscheiden, in welchen Fällen das System zum Vorteil des Objektes eingesetzt werden kann.

Eine beträchtlich Anzahl von Objekten wird in [Kotterer u. a., 2004] vorgestellt, einer Publikation, welche die im Rahmen der EUREKA-Initiative EUROCARE unter dem Projekttitel „PREVENT: Preventive Conservation“¹ gesammelten Erfahrungen zusammenfasst. Dokumentiert ist auch eine Reihe von gemessenen Fallbeispielen, die Ergebnisse sind jedoch leider nicht immer so umfassend dargestellt, wie dies für eine unabhängige Beurteilung wünschenswert wäre. Besonders verwiesen sei - auch wegen der Nähe des Objektes zu Kirchen - auf die Messungen und Simulationen von Šijanec Zavrl u. Žarni 'c [2004] zum Rittersaal im Schloss Brezice (Slowenien).

Sehr ausführlich zeigt und bewertet hingegen Kilian [2004] die in der Renatus-Kapelle in Lustheim (München) gemachten Messungen. In dieser kleinen Kapelle, intergriert in den südlichen Pavillon, sollten in erster Linie die im Winter zu stark absinkenden Temperaturen (auch bedingt durch relativ hohen Lufwechsel) vermieden und das damit verbundene, sehr feuchte Raumklima mit deutlichen Zeichen von Kondensation

¹EUROCARE EU-1383 PREVENT

verbessert werden. Dieses Ziel konnte nachweislich mit der Wandtemperierung erreicht werden: Die Temperatur konnte zwischen 5°C und 10°C gehalten werden (während sie im unbeheizten Zustand durchaus unter 0°C absank), die relative Feuchte im Raum schwankte zwischen 40% und 60% (anstatt wie vorher um 80%), und lag damit durchwegs unter der nach [Sedlbauer u. a., 2002] berechneten kritischen Feuchte für mikrobiologisches Wachstum.

Auch eine Reihe von Untersuchungen im Auftrag des erzbischöflichen Ordinariates München lagen der Autorin zur Einsicht vor [Seele, 1998c,b,a].

Am ausführlichsten zeigt das Gutachten zur kath. Pfarrkirche St. Emmeram [Seele, 1998b] mit Messungen über mehr als drei Monate und ergänzenden Berechnungen den Einfluss der Temperieranlage. In der mittelgroßen Kirche aus den 30er-Jahren (21x43m, etwa 8000 m³), mit 64 cm (Hauptschiff) bzw. 38 cm (Seitenschiff) dicken Ziegelmauern ist seit 1996 eine Temperieranlage² in Betrieb. Die noch bestehende Bankheizung wurde im Messwinter nicht, die Fußbodenheizung im Altarraum nur an besonders kalten Tagen aktiviert. Versorgt wird die Heizanlage von einem Gas-Brennwertkessel (Nennleistung 77 kW), betrieben mit einer konstanten Vorlauftemperatur von 60°C Vorlauf (über das ganze Jahr).

Die Messungen von Mitte Februar bis Ende Mai 1998 zeigen ein geringes Höhenprofil in der Kirche (nur 0,5K Temperaturdifferenz). Die beobachtete mittlere Raumlufttemperatur schwankt jedoch ziemlich stark (9–24°C, bzw. 9–15°C im Februar und März) in Abhängigkeit von der Außentemperatur, außerdem ist ein großer Einfluss der Sonneneinstrahlung auf das Raumklima erkennbar. Ein Einfluss der Temperieranlage auf die Wandtemperatur ist in 50cm kaum mehr erkennbar - sie liegt dann, ähnlich wie in 1m Höhe, geringfügig unter Lufttemperatur. Der Rauchversuch zeigt dem entsprechend auch einen sich bis in 40 cm Höhe anschmiegenden Luftstrom, dann Verwirbelungen mit Bewegungstendenz zur Raummitte.

Ergänzend zur Messung des Tiefenprofils wurden die Isothermen im Sockelbereich berechnet, sowohl mit als auch ohne Temperierung. Die dargestellten Ergebnisse zeigen die höheren Transmissionsverluste. Die Wärmestromdichte ist - auch unter Berücksichtigung der in Teilbereichen durch trockeneres Material schlechteren Wärmeleitung - bei der Sockeltemperierung etwas erhöht.

²Temperierkreise entlang des Außenwandsockels unter Putz, um beide Kirchenbankreihen unter Holzsockelleiste, auf der Orgelepore umlaufend auf Putz, an der Anschlusscke Seitenschiff-Hauptschiffwände auf Putz

6.2.2 Strahlungsheizung

Abgesehen von Fußbodenheizungen und Bankheizungen, die auch in die Kategorie der Strahlungsheizungen fallen, werden in Kirchen teilweise auch Hochtemperatur-Strahlungsheizungen verwendet. Diese lassen sich grundsätzlich in direkt mit Gas befeuerte und elektrisch versorgte unterscheiden [Camuffo, 2007]. Beide Systeme nutzen das Prinzip, dass das Behaglichkeitsempfinden von Personen im direkten Strahlungsbereich auch ohne nennenswerte Erhöhung der Lufttemperatur deutlich verbessert wird.

Ausführlich dargestellt wurde das Prinzip Kirchenheizung mit Gas-Infrarot-Strahlern in [Clasen, 1991; Kämpf u. Clasen, 1995]. Sie sehen darin die ideale Lösung, die es erlaubt, sparsam (ohne Vorheizzeiten) die Behaglichkeit dort zu verbessern, wo der Bedarf besteht, ohne die Temperatur im gesamten Raum anheben zu müssen. Die von ihnen beschriebenen Hellstrahler verfügen über eine Abgas-Abführungsanlage, die jedoch, ihres Erachtens, in Kirchen dank kurzzeitiger Nutzung, großem Rauminhalt und hohen Außenluftstroms nicht unbedingt nötig sei. Messungen in der Eusebiuskirche von Arnhem (Niederlande) hätten gezeigt, dass das mechanische Absaugsystem keinen wesentlichen Einfluss auf das Feuchtigkeitsniveau der Kirche hat. Von der insgesamt erzeugten Feuchtigkeit werde nur ein Teil abgeführt, der Rest werde über natürliche Ventilation abgeführt oder erhöhe die Wasserdampfkonzentration im Raum. Dennoch komme es nur sehr selten zu Kondensation.

In den drei von Schellen [2002] geschilderten Fällen ist keine Abführung der Abgase vorgesehen.

Anlass der Untersuchungen war das Vorhaben in der Kirche zu Unserer Lieben Frau in Dordrecht, eine direkt befeuerte Strahlungsheizung in der Kirche zu installieren. Simulationen der TU Eindhoven ergaben beträchtliche Mengen von CO₂ und Wasserdampf, die in den Raum gelangen würden: 60 kg/h bei den geplanten 16 Strahlungselementen mit einer Gesamtleistung von 375 kW. Diese würden beim geringen Luftwechsel der Kirche (0.08 1/h) zu einer beträchtlichen Erhöhung der absoluten Feuchtigkeit führen und zu Kondensationsrisiko an Wänden im Strahlungsschatten sowie nach Abschalten der Heizung. Außerdem wurden Oberflächentemperaturen von 40°C an der hölzernen Kanzel berechnet. Von einer solchen Heizung musste klar abgeraten werden. Um die Plausibilität der Simulationsergebnisse zu prüfen, wurden zwei Kirchen mit installierten Gas-Strahlern vermessen.

In der römisch-katholischen Kirche in Bommel, die mit 0.06 1/h

einen ähnlich niedrigen Luftwechsel wie die Kirche in Dordrecht hat, wurden die absolute Feuchtigkeit gemessen und Infrarotaufnahmen der Oberflächen (Abbildung 6.17) gemacht. Die Werte wurden in relative Feuchtigkeit in Oberflächennähe umgerechnet. Dunkelrote Bereiche der Bilder sind stark kondensationsgefährdet. Die von Bild zu Bild dunkler werdenden Wände zeigen, dass die Feuchtigkeit schneller zunimmt als die Oberflächentemperatur, insbesondere Fenster und wenig bestrahlte Flächen im Altarraum sind gefährdet. Aber am dramatischsten ist die Situation nach Abschalten der Heizung: Die Oberflächentemperaturen sinken rasch, die absolute Feuchtigkeit hingegen bleibt praktisch konstant, sodass es in großen Bereichen zu Kondensation kommt.

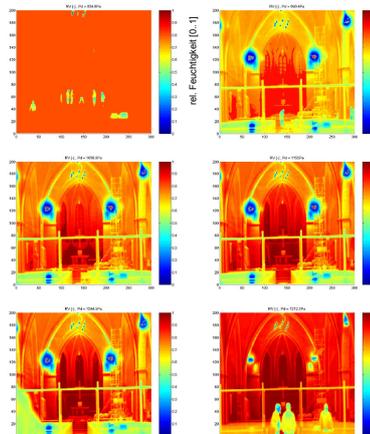


Abbildung 6.17: Hygrographen (relative Feuchtigkeit in Oberflächennähe) aus Infrarotbildern (im 1/2-Stunden Intervall) und gemessener absoluter Feuchtigkeit berechnet; dunkelrote Stellen sind stark kondensationsgefährdet; aus [Schellen, 2002]

In der Großen Kirche (Laurentiuskirche) in Alkmaar ist die Situation weit weniger dramatisch: Der größere Luftwechsel (0.4 bis 1.2 1/h wurden gemessen) und die wärmeren Oberflächen - dank einer Fußbodenheizung, die die Kirche auf 5°C hält - vermeiden Kondensation an den Oberflächen. Allerdings steigt die Temperatur an direkt angestrahlten Flächen auf bis zu 35°C an.

Schellen [2002] schließt aus den Messungen, dass direkt gasbefeuerte Anlagen ohne Abgasabführung durch die eingebrachten 17 kg Wasser je Stunde und 100 kW Heizleistung eine Gefahr für Gebäude und Ausstattung sind, insbesondere in Gebäuden mit geringem Luftwechsel.

In Südtirol sind gasbetriebene Strahlungsheizungen nicht sehr geläufig. Allein in der kleinen Pfarrkirche von Penon konnte eine ausfindig gemacht und vermessen werden (Anhang C.1.14). Auch hier wurden ein deutlicher Anstieg der relativen Feuchtigkeit und beträchtliches Kondensationsrisiko beobachtet.

Die von Schellen [2002] beschriebenen Risiken direkt gasbefeuerter Hochtemperaturstrahler zählt auch Camuffo [2007] auf, und nennt zudem die von der starken konvektiven Strömung über wandmontierten Strahlern herrührenden Schwärzung sowie ästhetische Probleme. Nicht zuletzt weist er auf die mit dem brennbaren Gas im Kirchenraum verbundenen Risiken hin.

Bei elektrischen Infrarotstrahlern fällt das Problem der anfallenden und abzuführenden Verbrennungsprodukte (inklusive des Wasserdampfes) weg, Kondensation an kalten Oberflächen sollte deshalb weniger problematisch sein (in ähnlicher Größenordnung wie z.B. bei der Bankheizung). Andjulovici [1995] beschreibt sie entsprechend auch als interes-

te Lösung, die richtige Positionierung der Strahler im Raum als Herausforderung für technisches Wissen, Geschicklichkeit und Phantasie des Ingenieurs. Auch ästhetisches Problem sieht er keines: Die Gestaltung der Elemente ist sehr flexibel, bei guter Absprache zwischen Heizungsingenieur, Architekt und Hersteller können sie neben der technischen auch eine Aufgabe als Schmuckbereicherung erfüllen. Der sich einstellenden „Fußkälte“ (da sich die Füße bei Strahlung von oben im „Schatten“ befinden) empfiehlt er mit Fußbodenheizung und Niedertemperatur-Strahlungselementen in den Bänken entgegen zu wirken.

Etwas vorsichtiger urteilt Camuffo [2007], der auch hier auf die bestehende Gefahr der Oberflächenaufheizung von wertvollen Objekten im direkten Strahlungsbereich hinweist und auf konvektive Schwärzung über den Elementen. Auch die ästhetische Frage beurteilt er weit weniger optimistisch. Quartz-Halogen Strahler schließlich sollten wegen ihres UV-Anteils in Kirchen grundsätzlich nicht eingesetzt werden.

Die Messungen in Kuens (über eine Woche, siehe Anhang C.1.10) und St. Anton/Kaltern (ein Tag, siehe Anhang C.1.8) bestätigen den geringen Einfluss auf das Raumklima (bei der installierten Leistung praktisch nicht vorhanden). Die empfundene Temperatur in St. Anton stieg am Leseputz (im Abstand von 4 m) innerhalb von kurzer Zeit von 7°C auf 9°C, ohne Zunahme der Lufttemperatur selbst. Da es sich in beiden Fällen jedoch um am Boden stehende Geräte handelte, und sich damit nur ein geringer Teil der Besucher im direkten Strahlungsfeld befinden kann, scheinen sie eher dafür geeignet, in Teilbereichen (wie z.B. am Altar, am Leseputz, etc.) für angenehmes Klima zu sorgen, denn in den Kirchenbänken.

6.3 Bewertungs- und Entscheidungshilfen

6.3.1 Kennwerte - Leistungsanforderungen

In Abschnitt 2.3.6 wurden bisher in der Literatur ausgesprochene Empfehlungen für Anforderungen ans Heizungssystem bezüglich Temperatur, Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit sowie deren Veränderung zusammengetragen (siehe auch Tabelle 2.7). Im konkreten Einzelfall spielt allerdings immer auch die raumklimatische Situation, auf die sich die Objekte eingestellt haben, eine prägende Rolle - nicht umsonst geht die Tendenz weg von Grenzwerten, wie z.B. die europäischen Normentwürfe EN 15757 [DIN EN 15757 (Entwurf), 2008] und EN 15759 [DIN EN 15759 (Entwurf), 2008] zeigen.

Eigenschaft	Symbol	Einheit	unt.Grenze	ob.Grenze
Nutzungstemperatur	ϑ_i	°C	-*	12-15†*
				abh. von Außenklima bei Heizung mit Strahlungsanteil
Grundtemperatur	ϑ_g	°C	5	10
				abh. von Außenklima bei Gasstrahlerheizung
Mittlere relative Feuchtigkeit	φ_{Mittel}	%	45‡	75‡
Jahresschwankung r.F.	$\Delta\varphi_{Jahr}$	%		30
Spitzen relative Feuchtigkeit	φ_{Spitze}	%	40‡	90‡
Tagesschwankung r.F.	$\Delta\varphi_{Tag}$	%		10
Heizrampe	$\Delta\vartheta/\Delta t$	K/h		1*
Heizdifferenz*	$\Delta\vartheta$	K		4*
Temperaturprofil	$\Delta\vartheta/\Delta h$	K/m		0.1
			$\Delta\vartheta_{max}$	K
Luftgeschwindigkeit	v	m/s		über Gesamthöhe 0.15
Luftheizung				
Zulufttemperatur	ϑ_{ZuL}	°C		ϑ_i+25
"Wurflänge"	l_{max}	m		2/3 l_{Obj}
Zuluftgeschwindigkeit	v_{ZuL}	m/s	Ar<0.05	$f(l_{max})$
Anzahl Zuluftgitter	n_{ZuL}		A.4	
Anzahl Abluftgitter	n_{AbL}		$n_{ZuL}/5$	
Fußbodenheizung				
Fußbodentemperatur	ϑ_{Boden}	°C		25-28
Gasstrahlerheizung				
Oberflächentemperatur	ϑ_O	°C		(25-30)* für empfindliche Objekte schon zu viel

Tabelle 6.1: Werte zur Orientierung; Anforderungstabelle für Heizungen nach [Schellen, 2002], * veränderte Werte; †abhängig vom lokalen Klima können höhere Werte erlaubt sein, u. U. sind aber auch niedrigere nötig; ‡allgemeine Grenzwerte! Spezifische Werte hängen von Klimageschichte der Kirche ab.

Dennoch können formulierte Leistungsanforderungen hilfreich sein, indem sie eine erste Orientierung geben. Deshalb wird hier die von Schellen [2002] auf der Basis einer sehr ähnlichen Erhebung erarbeitete, aber aufgrund seiner Messungen und Erfahrungen erweiterte und nach den drei Heizungstypen „Luftheizung“, „Fußbodenheizung“ und „Gasstrahlerheizung“ differenzierte Anforderungstabelle vorgestellt. In einigen Punkten werden allerdings aufgrund von eigenen Messungen und Berechnungen der Autorin Anpassungen vorgeschlagen.

Für die **Nutzungstemperatur** - i.d.R. ein Kompromiss zwischen Behaglichkeit für Nutzer und Sicherheit für wertvolle Objekte - setzt Schellen [2002] den Maximalwert (der indirekt eine minimale relative Feuchtigkeit garantiert) von den vielfach postulierten 12-15°C auf 15-20°C hinauf, mit dem Argument, die 12°C seien Folge eines extrem kalten und trockenen Winters gewesen. Gerade diese Bemerkung zeigt auf, wie riskant es ist, Minima der relativen Feuchte durch eine Maximaltemperatur vermeiden zu wollen: Was in den Niederlanden und Norddeutschland ein extrem kalter und trockener Winter ist, ist in den Alpen unter Umständen der Normalfall (siehe

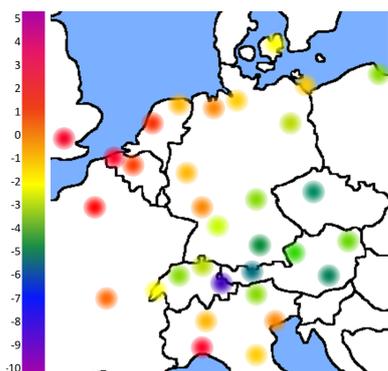


Abbildung 6.18: Mittelwert der Taupunkttemperatur im Januar für unterschiedliche Standorte in Europa (siehe Anhang A.5)

auch Abbildungen 6.18 und 2.40). Die Empfehlungen für die Nutzungstemperatur werden deshalb auf 12-15°C „zurückgestellt“ - mit dem klaren Verweis, dass abhängig vom lokalen Klima höhere Werte erlaubt sein können, unter Umständen aber auch niedrigere nötig sind.

Die von Schellen [2002] anstelle einer niedrigen Maximaltemperatur empfohlene hygrostatische Regelung, welche bei niedriger relativer Feuchte die Heizung beschränkt, ist auf jeden Fall empfehlenswert, aber 20°C geben für viele Orte eine falsche Vorstellung von „möglichen“ Temperaturen. Die 12-15°C entsprechen in größeren Bereichen Europas einer akzeptablen relativen Feuchte und garantieren bei winterlicher Kleidung auch halbwegs annehmbare Behaglichkeit für die Besucher. Bei den beiden Heizungen mit Strahlungsanteil hat schon Schellen [2002] die maximale Nutzungstemperatur auf 15°C gesetzt, da durch den Strahlungsanteil Behaglichkeit schon bei geringerer Lufttemperatur erreicht wird. Entsprechend müsste aber konsequenterweise auch bei der Luftheizung nicht die Lufttemperatur sondern am besten die von Luft und Oberflächen bestimmte operative Temperatur betrachtet werden - die je nach Betriebsweise (stationär, mit Grundtemperierung, instationär) stark variieren wird (siehe auch Versuch von Schlieder [1967], hier zitiert auf S. 11).

Der Minimalwert für die Nutzungstemperatur von 15°C wurde ersatzlos gestrichen. Man könnte hier von Behaglichkeitskriterien ausgehen (wie in Abschnitt 2.1 beschrieben), aber da die Erwartung der Besucher an die Kirchenraumtemperatur regional stark schwankt, wäre die Formulierung eines Mindestwertes u.U. kontraproduktiv.

Die **Grundtemperatur** kann (i) der Vermeidung von Kondensation, (ii) einer geringeren Temperaturdifferenz beim Aufheizen auf Nutzungstemperatur und (iii) mehr Behaglichkeit durch wärmere Oberflächen dienen.

Zum Frostfreihalten und zur Vermeidung von Kondensation an den Wänden empfehlen Künzel u. Holz [1991]; Mainz [1973] und andere mindestens 5°C. Schellen [2002] schließt sich dieser Ansicht an, empfiehlt aber, jedenfalls einen Taupunktstand von mindestens 3-4 K anzustreben und die Grundtemperatur nach Messung der sich in der konkreten Kirche einstellenden absoluten Feuchtigkeit über ein Jahr zu bestimmen. Die hier vorgestellten Messungen zeigen, dass in kalten, trockenen Regionen die Grundtemperatur deshalb evtl. auch unter 5°C liegen kann. Für die Strahlungsheizung - im Fall einer direkten Verbrennung von Gas im Kirchenraum ohne Abgasabfuhr - weist Schellen [2002] speziell auf die Notwendigkeit hin, mit einem (anderen) Heizungssystem eine Grund-

temperatur (von mindestens 8°C zu halten), um Kondensation aufgrund des großen Feuchteintrags zu vermeiden.

Nach oben wird die Grundtemperatur indirekt von der minimalen relativen Feuchtigkeit begrenzt, aber selbstverständlich auch von der Frage nach dem Energiebedarf, insbesondere bei nur am Wochenende genutzten Kirchen.

Zu Punkt (ii) siehe neu eingeführte Kategorie „Heizdifferenz“.

Für die **relative Feuchtigkeit** sind in Tabelle 6.1 obere und untere Grenzwerte für Mittelwert und Spitzen angegeben. Werte unter 40-45% sind nach Schellen [2002] kritisch in Bezug auf Schwindrisse u.Ä., Werte über 70-75% heben das Risiko für Pilzbefall. Als grobe Richtwerte können sie so stehen bleiben, auf jeden Fall aber mit dem Hinweis versehen, dass jede Kirche eine „typische“ relative Feuchte hat, an die sich Gebäude und Ausstattung unter Umständen über Jahrhunderte angepasst haben. Die erlaubte Schwankung von 30% im Jahreszyklus und 10% im Tageszyklus basieren auf „Erfahrungen aus der Praxis“ von Künzel u. Holz [1991], wird aber auch durch die Messungen von Jakiela u. a. [2007a,b] bestätigt und scheint als Richtwerte durchaus plausibel, da vielerorts auch die natürlichen Schwankungen in diesem Bereich liegen.

Die **maximale Aufheizrate**, von Schellen [2002] auf 2K/h angesetzt, wurde in Anlehnung an Arendt [1993], aber auch gestützt auf die Arbeiten von Jakiela u. a. [2007a,b] (siehe auch Abbildung 2.10 und 2.11), auf 1K/h reduziert. Damit die gezielte Aufheizrampe das gewünschte Ergebnis und keinen „Sägezahn“ erzielt, muss der Sensor (besser: die Sensoren) richtig positioniert sein und die Heizung, wenn möglich, modulierbar sein (siehe Abschnitt 4.5.1).

Außerdem wird als zusätzlicher Parameter eine maximale **Aufheizung** um 4 K empfohlen (siehe auch Arendt [1986]). Dieser entspricht (ohne dass Sorptionsvorgänge vorliegen) eine Reduktion der relativen Feuchtigkeit von 10-18%, je nach Ausgangsfeuchtigkeit (siehe Abbildung 6.19). In der realen Kirche werden hygroskopische Materialien dem Absinken der relativen Feuchtigkeit entgegenwirken, indem sie Wasserdampf abgeben. Bei großen Mengen unempfindlicher hygroskopischer Objekte können diese das Raumklima für evtl. vorhandene sensiblere Objekte puffern - in solchen Fällen sind auch größere und schnellere Schwankungen erlaubt. Sind es jedoch die zu schützenden Objekte selbst, die den Feuchteausgleich übernehmen, ist, sowohl was Änderungsrate als auch absolute Differenz angeht, Vorsicht geraten.

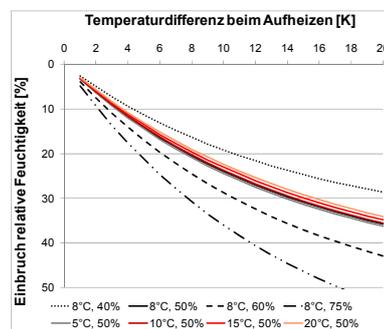


Abbildung 6.19: Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz und Änderung der relativen Feuchtigkeit für unterschiedliche Ausgangstemperaturen und Ausgangsfeuchten (unter der Annahme, dass keine Sorptionsvorgänge stattfinden)

6.3.2 Bewertung des Raumklimas aus Sicht der Ausstattung

Auf Grundlage der im Abschnitt 2.3 beschriebenen, vom Raumklima induzierten Schadensmechanismen und in Anlehnung an die von Camuffo [2007] beschriebene Zuordnung von Ausstattungskategorien zu Schadensmechanismen und von der Heizung induzierten Raumklimasituationen wird im folgenden eine Matrix entworfen, welche eine erste Abschätzung der zu berücksichtigenden Faktoren für die Bewertung des Raumklimas aus Sicht der Ausstattung unterstützt (Tabelle 6.2).

	niedrige Temperatur	Temperaturprofil (oben wesentlich wärmer als unten)	Schwankung / starke Einbrüche relativer Feuchtigkeit	niedrige relative Feuchtigkeit	Kondensation an kalten Oberflächen	hohe rel. Feuchte in Oberflächennähe	hohe Oberflächen-temperatur	Turbulenz und hohe Geschwindigkeit an Oberflächen	Staubaufwirbelung	Schadstoffe	UV	konvektive Luftströmung	Auftriebsströmung	Kapillare Feuchte
Orgeln	Z	R	r	R		BV	r, A	V	v	v	AoM	v	v	
Kassetendecken		R, A	r, A	R		BV	r, A	V	v	V	AoM	v	V	
Holzaltäre		r, A	r, A	R		BV	r, A	V	v	v	AoM	v	v	
Holzfiguren			r, A	R		BV	r, A	V	v	v	AoM	v	v	
Gefasstes Holz			r, A	R		BV	r, A	V	v	v	AoM	v	v	
feingeschnitzte Ornamente				?		BV	r, A	V	v	v	AoM	v	v	
Tafelbilder				R		BV	r, A	V	v	V	AoM	V	V	
Leinwandgemälde				?		BV	r, A	V	v	V	AoM	V	V	
Teppiche				?		BV		V	v	fading	fading			
Steinaltäre			s		v, s, bv	v, s, bv		V	v	v, s		v	v	
Steinskulpturen			s		v, s, bv	v, s, bv		V	v	v, s		v	v	
Stuckarbeiten			S		v, s, bv	v, s, bv		V	V	V, S		V	V	
Fresken		S	S		V, s, bv	V, s, bv		V	V	V, S		V	V	
Gewölbe		S	S		V, s, bv	V, s, bv		V	V	V, S		V	V	
Putz			S		V, s, bv	V, s, bv		V	V	V, S		V	V	S
Mauerwerk			S		S									S
Fenster					V, BV	bv		V		V		V	V	

Tabelle 6.2: Durch typische Raumklimasituationen ausgelöste Schadensmechanismen an unterschiedlichen Ausstattungskategorien
 Großbuchstaben=großes Risiko, Kleinbuchstaben=geringeres Risiko; BV=biologischer Verfall, S=Salzausblühungen, V=Verschmutzung durch Partikelablagerung, R=Schwindrisse, Z=Zinnpest, AoM=Abbau organischen Materials

6.3.3 Bewertungskriterien für Heizungssysteme

Bei der Beschreibung der einzelnen Heizungssysteme in Abschnitt 6.4 wird auch ihre Bewertungen nach [Camuffo, 2007] und [Schellen, 2002] vorgestellt, gegebenenfalls kommentiert und angepasst. An dieser Stelle seien deshalb die beiden Bewertungssysteme vorgestellt:

Bewertungskriterien nach Camuffo [2007]:

- Risiko abrupter Temperaturänderungen $\Delta\vartheta$
- Risiko abrupter Änderungen der relativen Feuchtigkeit $\Delta\varphi$, **Min** φ oder zu niedriger relativer Feuchtigkeit
- Risiko für **Kondensation** an kalten Oberflächen (Wände, Decke, Fußboden)
- **Ablagerung** von Rauch, Staub und anderen Partikeln durch Luftströmungen und andere Ablagerungsmechanismen
- Produktion von **Schadstoffen**: chemisch, z.B. Verbren-

nungsprodukte, Wasserdampf, Licht, UV Strahlung, Staubwirbelung

- **Behaglichkeit** für Gottesdienstbesucher, Priester und Musiker, Belästigung durch Blendung
- **Sichtbarkeit**
- **Eingriff** in die Struktur

Camuffo [2007] weist explizit darauf hin, dass sich einige Bewertungen, wie z.B. die Behaglichkeit, in Abhängigkeit vom Außenklima (mild/kalt, trocken/feucht), aber auch von der Größe des Gebäudes und dessen Hülle ändern können.

Bewertungskriterien nach Schellen [2002]:

- E-Energieverbrauch
E-Vorheizen: kurzes Vorheizen ausreichend (und daher energiesparend)
E-lokal: lokale Beheizung möglich
- H-Heizleistung
H-Leistung: benötigte Leistung (klein - positiv, groß - negativ)
H-regelbar: Regelbarkeit der Heizung
- B-Thermische Behaglichkeit
B-Strömung: Luftströmung im Aufenthaltsbereich
B- ϑ_{Str} : Strahlungstemperatur
B-Asymmetrie: Strahlungsassymetrie
B- ϑ_{Boden} : Fußbodentemperatur
B-Profil: Höhenprofil
- Denkmalpflege - hier nicht angewandt, da bei Camuffo [2007] detaillierter
- I-Impact
I-bau: baulicher Eingriff
I-ästh: ästhetische Belastung
- K-Kosten
K-Installation

Legende der Bewertung:

- ++ kleinstmögliches Risiko oder bestes Verhalten - verglichen mit anderen Systemen
- + geringeres Risiko oder besseres Verhalten - verglichen mit anderen Systemen
- o mittleres Risiko oder durchschnittliches Verhalten - verglichen mit anderen Systemen
- größeres Risiko oder schlechteres Verhalten - verglichen mit anderen Systemen
- sehr großes Risiko oder sehr schlechtes Verhalten

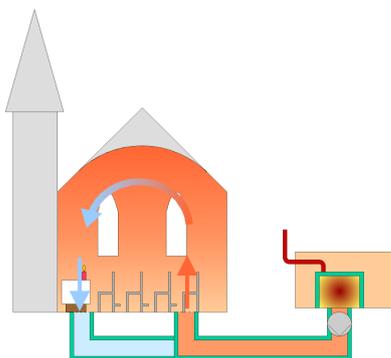


Abbildung 6.20: Funktionsprinzip einer Luftheizung



Abbildung 6.21: Im Heizraum steht entweder ein direkter Luftheizer (oben) oder ein Heizkessel (unten), der die Wärme des Heizwassers über einen zentralen Wärmetauscher oder in einzelnen Wärmestationen an die Kirchenluft abgibt

6.4 Übersicht Heizungssystem

6.4.1 Luftheizung

Bei der am weitesten verbreiteten Variante der Luftheizung wird Luft zentral erwärmt, von Ventilatoren über Kanäle zum Kirchenraum geführt, dort über ein oder mehrere Zuluftgitter in den Raum eingeblasen, über ein oder mehrere Abluftgitter wieder abgezogen und durch Kanäle wieder in den Heizraum zurückgeführt. Die Luft kann entweder in einem Luftheizer direkt oder über einen Wärmetauscher indirekt erwärmt werden. In letzterem Fall ist man in der Wahl des Heizkessels sehr frei, am häufigsten sind nach wie vor Öl und Gas als Brennstoffe.

Als Positionen für Zuluft- und Abluftgitter kommen sowohl der Boden als auch die Wände in Frage. Von der Verteilung der Zu- und Abluftöffnungen, aber auch von der Temperatur und Geschwindigkeit der Zuluft hängt wesentlich die erreichbare Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung ab. Wichtige Elemente sind auch der Schalldämpfer, ebenso wie ein Filter, der - regelmäßig gereinigt - die Zirkulation von Staub vermindert, und eine ausreichende Wärmedämmung der Kanäle.

Bei den sogenannten Wärmestationen hingegen wird nicht die Luft, sondern Wasser zentral erhitzt und verteilt. Die Luft wird erst in den einzelnen Stationen in der Kirche (i.d.R. im Boden eingelassen) erwärmt und in den Raum geblasen. Dadurch wird der bauliche Aufwand für die Kanäle, der in der Regel auch mit einem beträchtlichen Eingriff in die Substanz der Kirche verbunden ist, deutlich reduziert. Zudem können die im Vergleich zu Luftkanälen wesentlich kleineren Rohrleitungen leichter wärmegeklämt werden als die großvolumigen Kanäle. Bei nicht stationärem Betrieb ist auf Frostsicherheit zu achten.

Luftheizungen heizen auf jeden Fall den gesamten Raum - im besten Fall ist die Temperaturverteilung gleichmäßig, bei ungünstiger Ausführung ist es im Aufenthaltsbereich kälter als in anderen Bereichen der Kirche. Es kommt zur Ausbildung einer Luftwalze im Raum, die umso stärker ist, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Oberflächen ist, da die aufsteigende warme (Zu-)Luft an der kalten Decke und Außenwand abkühlt und den Wänden entlang zu Boden „fällt“. Wird die Kirche langsam durch nicht zu warme Luft aufgewärmt oder kühlen die Wände nicht zu stark ab, dann sind die Luftströmungen weniger ausgeprägt und langsamer. Es

wird weniger Schmutz aufgewirbelt und mitgerissen, Kerzen flackern - und rußen dadurch - weniger.

Luftheizungsanlagen sind leistungsstark und sehr gut regelbar. Sie eignen sich dadurch für alle drei Betriebsarten:

- Bei stationärem Betrieb wird die Lufttemperatur durch die Regelung und einen feinfühligem Temperatursensor in der Kirche konstant gehalten.
- Bei instationärem Betrieb mit Grundtemperierung kann die Temperaturerhöhung gezielt langsam und schrittweise erfolgen.
- Bei rein instationärem Betrieb, wie er vor allem bei älteren Systemen vorkommt, kann die Raumluft (nicht aber die Wand!) in kurzer Zeit aufgeheizt werden.

Für typische Temperaturverteilung und Fallbeispiele sei hier verwiesen auf die Abbildungen in Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 sowie auf die vergleichende Auswertung in Abschnitt 4.3, den Vergleich unterschiedlicher Luftheizungssysteme in Abschnitt 4.4, die Anmerkung zu Aufheizrampe in Abschnitt 4.5.1, die Ergebnisse der dynamischen Simulation in Abschnitt 5.2, den Vergleich mit anderen Beispielen aus der Literatur in Abschnitt 6.1.1 und die Kurzporträts der in Südtirol (Italien) untersuchten Kirchen in Anhang C.1.

Zusammenfassend die Vor- und Nachteile:

- ⊕ Das System ist gut regelbar, und dadurch auf verschiedene Bedürfnisse einstellbar. Zum Beispiel sind Grundtemperierung und Temperaturerhöhung für die Gottesdienste gut realisierbar. Aber auch auf Wärmeeintrag von außen kann durch Reduzieren der Heizleistung theoretisch gut reagiert werden.
- ⊕ Luftheizungen können mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern gekoppelt werden, nicht zuletzt auch mit solchen, die mit nachhaltigen Brennstoffen betrieben werden, wie z.B. Hackschnitzelheizungen, mit Blockheizkraftwerken³ und mit Fernwärme.
- ⊕ Luftheizungen können auch sehr große Räume gleichmäßig aufwärmen.
- ⊕ Es besteht die Möglichkeit der Luftbefeuchtung oder Luftentfeuchtung - wobei erstere in der Regel nicht empfohlen werden kann, da das Risiko der Kondensation an kälteren Oberflächen groß ist. Besser geeignet ist eine Regelung, die bei Unterschreiten eines Grenzwertes der relativen Feuchte die Solltemperatur der Raumluft reduziert.

³nur sinnvoll bei stationärem Betrieb!



Abbildung 6.22: Beispiele für Luftheizungsauslässe

Luftheizung - instationär				Kommentar
nach [Camuffo, 2007]				
	i	G	s	
$\Delta\vartheta$	-	+/- → o	o	In dieser Arbeit wurde kein
$\Delta\varphi$	- → - -	o/-	- - → -/o†	I.d.A. wurde ein starker Feuchteabfall im instationären Fall, aber kaum eine zu niedrige rel. Feuchte im stationären Fall beobachtet
Kondensation	-	o	+	
Ablagerung	- → -/o	- -/- → -/o	- - → -/o	I.d.A. wurde keine überdurchschnittliche Ablagerung beobachtet ‡
Schadstoffe	Staubaufwirbelung			
Behaglichkeit	-	o/-	o	
Sichtbarkeit	-	-	-	
Eingriff	-	-	-	
nach [Schellen, 2002]				Kommentar
	wenige bzw. verteilte Zuluftgitter			
E-Vorheizen	++			Kurzes Vorheizen spart Energie, bringt, wie i.d.A. gezeigt, aber oft auch mehr Schäden und weniger Komfort
E-lokal	- -			
H-Leistung	o			
H-regelbar	++			
B-Strömung	- bzw. +			
B- ϑ_{Str}	-			
B-Asymmetrie	o			
B- ϑ_{Boden}	o			
B-Profil	+/- bzw. +			
I-bau	+ bzw. - -			
I-ästh	+ bzw. o			
K-Installation	+ bzw. - -			

Tabelle 6.3: Bewertungsmatrix für „Luftheizung“ nach Camuffo [2007] und Schellen [2002] (Beschreibung in Abschnitt 6.3.3); bei Anpassungen ist die ursprüngliche Bewertung grau und nach dem Pfeil (→) die neue rot dargestellt, in der Kommentarspalte wird die Anpassung jedenfalls begründet

†bei entsprechend niedrigerer Temperatur

‡abgesehen von Schwärzungsfahnen über Luftauslass

- ⊕ Die Anlage kann auch zum Lüften verwendet werden.
- ⊖ Es wird auf jeden Fall der gesamte Raum aufgeheizt
- ⊖ Durch die große Leistungsfähigkeit kann bei falscher Einstellung, Auslegung oder unsachgemäßer Handhabung schnell viel zerstört werden.
- ⊖ Der Einbau der Kanäle ist im Nachhinein nicht immer einfach und oft mit beträchtlichen Eingriffen in die Bausubstanz verbunden.
- ⊖ Bei nicht optimaler Positionierung der Zu- und Abluftgitter sowie ungünstiger Wahl der Zulufttemperatur und -geschwindigkeit kommt es zu Luftschichtung und gibt es Bereiche mit Luftzug. Im Bereich wandnaher Zuluftgitter sind häufig „Schmutzfahnen“ an den Wänden zu beobachten.
- ⊖ Bei ungenügender Schalldämmung ist die Anlage sehr laut.

6.4.2 Fußbodenheizung

Das im Heizkessel erwärmte Wasser wird durch im Boden der Kirche verlegte Rohre geführt. Dadurch erwärmt sich der Bodenaufbau, der diese Wärme dann zum Teil durch Konvektion an die Luft und zum Teil über Strahlung direkt an die Personen abgibt. Die Bodentemperatur liegt i.d.R. bei 15°C-25°C.

Nach Möglichkeit sollte der gesamte Fußboden beheizt werden, denn wenn nur ein Teil des Bodens für die Heizung genutzt werden kann, entstehen Bereiche unterschiedlicher Temperatur, was Zugluft nach sich zieht. Holzspiegel unter den Bänken sind grundsätzlich von Nachteil, da sie dämmend wirken, bieten aber in der nicht beheizten Zeit eine angenehmere Kontakttemperatur, und sollen zudem in der Regel aus Gründen der Denkmalpflege erhalten bleiben.

Da ein Teil der Wärme über Strahlung an die Personen und umgebenden Wände abgegeben wird, sind die Temperaturunterschiede zwischen Luft und Wänden nie so groß wie bei der Luftheizung, und es kommt zu weniger ausgeprägten Luftumwälzungen. In der Nähe von Fenstern kühlt die Luft ab und fällt in den Raum - es zieht. Dem kann nun entweder durch bessere Isolierung der Fenster (die Luft kühlt weniger ab) oder durch eine größere Leistung im Bodenbereich unter den Fenstern entgegen gewirkt werden.

Der durch Besucher eingebrachte Schmutz am Boden trocknet auf der warmen Oberfläche und wird dadurch leicht flüchtig, wodurch auch schon von geringen Luftströmungen angehoben werden. Eine Kirche mit Bodenheizung sollte deshalb regelmäßig feucht gereinigt werden.

Fußbodenheizungen sind langsam und träge, da erst die große Materialmasse des Fußbodens durch die Heizung aufgewärmt werden muss, bevor die Wärme in den Raum kommt. Sie eignen sich deshalb vor allem für stationäres Heizen. Aber auch eine Grundtemperierung mit langsamer und geringfügiger Temperaturerhöhung für die Gottesdienste ist denkbar.

Für typische Temperaturverteilung und Fallbeispiele sei hier verwiesen auf die Abbildung in Abschnitt 4.2.4, sowie auf die vergleichende Auswertung in Abschnitt 4.3, die Ergebnisse der dynamischen Simulation in Abschnitt 5.2 und 5.4.2, den Vergleich mit anderen Beispielen aus der Literatur in Abschnitt 6.1.2 und die Kurzporträts der in Südtirol (Italien) untersuchten Kirchen in Anhang C.1.

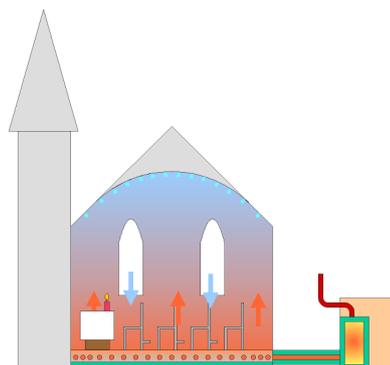


Abbildung 6.23: Funktionsprinzip einer Fußbodenheizung



Abbildung 6.24: Verlegen der Fußbodenheizung in der Pfarrkirche von St. Ulrich in Gröden

Fußbodenheizung		
nach [Camuffo, 2007]		Kommentar
$\Delta\vartheta$	+	
$\Delta\varphi$	- - -> - / 0	niedrige absolute Werte, denen durch Regelung entgegengewirkt werden muss
Kondensation	+	
Ablagerung	-	vor allem in kalten Deckenbereichen
Schadstoffe	keine	
Behaglichkeit	++	wenn vollflächig und keine Zugluft
Sichtbarkeit	++	
Eingriff	-	
nach [Schellen, 2002]		Kommentar
E-Vorheizen	- -	
E-lokal	- -	
H-Leistung	+	
H-regelbar	-	
B-Strömung	o	
$B-\vartheta_{Str}$	+	
B-Asymmetrie	+	
$B-\vartheta_{Boden}$	++	
B-Profil	+	
I-bau	- -	
I-ästh	++	
K-Installation	- -	insbesondere wenn der Boden aufgenommen und wieder verlegt werden soll sehr teuer

Tabelle 6.4: Bewertungsmatrix für „Fußbodenheizung“ nach Camuffo [2007] und Schellen [2002] (Beschreibung in Abschnitt 6.3.3); bei Anpassungen ist die ursprüngliche Bewertung grau und nach dem Pfeil (→) die neue rot dargestellt, in der Kommentarspalte wird die Anpassung jedenfalls begründet

Zusammenfassend die Vor- und Nachteile:

- ⊕ Die Fußbodenheizung ist praktisch unsichtbar und verursacht keine Geräuschbelästigung.
- ⊕ Die Wahl des Wärmeerzeugers ist sehr flexibel. Blockheizkraftwerke oder der Anschluss an Fernwärme bieten sich an (stationärer Betrieb!), energiesparende Niedertemperaturkessel oder auch erdreichgekoppelte Wärmepumpen können eingesetzt werden.
- ⊕ Durch den Strahlungsanteil der Wärmeabgabe steigt die empfundene Temperatur für die Besucher.
- ⊕ Die Wärmequelle ist direkt im Aufenthaltsbereich, auch für Besucher außerhalb der Kirchenbänke.
- ⊖ Es wird auf jeden Fall der gesamte Raum aufgeheizt.
- ⊖ Der Einbau in bestehende Kirche ist relativ aufwändig und mit beträchtlichem Eingriff in die Bausubstanz verbunden.
- ⊖ Bei stationärer Heizung besteht Gefahr von zu trockener Luft, eine entsprechende Regelung und Begrenzung der Solltemperatur der Raumluft kann dies vermeiden.
- ⊖ Kaltluftabfall im Fensterbereich ist möglich, wenn ihm nicht entsprechend entgegengewirkt wird (siehe oben).
- ⊖ Schmutz am Boden trocknet und „fliegt“ - insbes. bei Gewölben mit schlechtem U-Wert und entsprechend niedriger Temperatur führt das u.U. zu verstärkter Schwärzung.

6.4.3 Bankheizung

Bei Bankheizungen geben Heizelemente unter der Sitzbank, z.T. auch unter der Kniebank und an der Rücklehne der Vorderbank, Wärme durch Strahlung und Konvektion an die nahe Umgebung ab. Bei den Heizelementen kann es sich um wasserdurchströmte Heizrohre oder -platten handeln (Frostschutz bei nicht stationärem Betrieb!), weiter verbreitet sind jedoch elektrisch betriebene Elemente. Camuffo [2007] unterscheidet Hochtemperatur-Elemente (über 100°C) und Niedertemperatur-Elemente (unter 100°C), für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Systeme war eine Oberflächentemperatur von 60°C typisch. Die Wärmeabgabe geschieht vor allem im Aufenthaltsbereich, das Gemäuer bleibt kalt und auch die Luft erwärmt sich in weit geringerem Maße als bei einer Luftheizung.

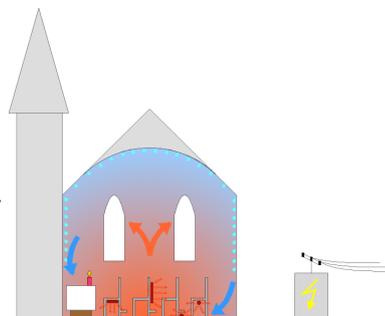


Abbildung 6.25: Funktionsprinzip einer Bankheizung

Der nachträgliche Einbau von Bankheizungen in der Kirche ist in der Regel unproblematisch, lediglich ein stärkerer Stromanschluss muss in den meisten Fällen bereitgestellt werden.

Kalt bleibt die Kirche für Gläubige außerhalb der Kirchenbänke und auch im Altarbereich, wenn dieser nicht durch Heizmatten o.ä. gesondert beheizt wird. Es entstehen „Wärmeinseln“ in der Kirche - und durch die Temperaturunterschiede kommt es vor allem am Rand der Kirchenbänke zu erheblichem Luftzug. Dass die Wände kalt bleiben, ist zwar vom Energieverbrauch her positiv, hat aber von der Denkmalpflege her unter Umständen verheerende Folgen: Bei regnerischem Wetter verdunstet im warmen Sitzbereich die Feuchtigkeit aus der Kleidung der Gläubigen, und diese Feuchtigkeit kondensiert an den kalten Flächen. Das fördert zum einen die Schimmelbildung, zum anderen bleibt der Schmutz, der durch den Luftzug aufgewirbelt wird, regelrecht an den Wänden kleben.



Abbildung 6.26: Beispiele für Bankheizungen

Bankheizungen werden praktisch immer instationär betrieben, d.h., sie werden vor dem Gottesdienst eingeschaltet. Die Heizung wird im Allgemeinen über eine Zeituhr gesteuert, das Regeln auf eine bestimmte Raumtemperatur ist nicht sinnvoll (und auch nicht möglich). Allerdings wird die Heizung in manchen Fällen als Frostschutz bei Sinken der Temperatur unter 5°C automatisch eingeschaltet bzw. umgekehrt bei Übersteigen einer bestimmten Temperatur abgeschaltet.



Abbildung 6.27: Heizmatte im Altarbereich

Für typische Temperaturverteilung und Fallbeispiele sei hier verwiesen auf die Abbildung in Abschnitt 4.2.3, sowie auf die vergleichende Auswertung in Abschnitt 4.3, die Ergebnisse der dynamischen Simulation in Abschnitt 5.4.2, den Vergleich

Bankheizung				Kommentar
nach [Camuffo, 2007]				
	HT	NT	FrH	
$\Delta\vartheta$	+/-	+	+	bei HT Schwankungen im Bankbereich
$\Delta\varphi$	+/o	+	+	bei HT Schwankungen im Bankbereich
Kondensation	-	-	o/+	positive Bewertung bei FrH bezieht sich auf Empfehlung zu evtl. Entfeuchtung
Ablagerung	o/-	+/o	+/o	bei großer Leistung schlechter als hier bewertet
Schadstoffe	keine			
Behaglichkeit	o/-	o/-	o/+	
Sichtbarkeit	o/+	o/+	o/+	
Eingriff	-/+	-/+	+	
nach [Schellen, 2002]				Kommentar
generell				
E-Vorheizen	++			
E-lokal	++			
H-Leistung	++			
H-regelbar	-			
B-Strömung	-			
B- ϑ_{Str}	+			
B-Asymmetrie	+			
B- ϑ_{Boden}	++			
B-Profil	+			
I-bau	o			
I-ästh	o			
K-Installation	o			

Tabelle 6.5: Bewertungsmatrix für „Bankheizung“ nach Camuffo [2007] und Schellen [2002] (Beschreibung in Abschnitt 6.3.3); bei Anpassungen ist die ursprüngliche Bewertung grau und nach dem → die neue rot dargestellt, in der Kommentarspalte wird die Anpassung jedenfalls begründet, HT=Hochtemperatur-Strahlungselemente, NT=Niedertemperatur-Strahlungselemente, FrH=Friendly Heating (siehe Abschnitt 6.1.3, S.123)

mit anderen Beispielen aus der Literatur in Abschnitt 6.1.3 und die Kurzporträts der in Südtirol (Italien) untersuchten Kirchen in Anhang C.1.

Zusammenfassend die Vor- und Nachteile:

- ⊕ Es wird nicht der gesamte Raum wird aufgeheizt.
- ⊕ Auch ein nachträglicher Einbau ist relativ einfach.
- ⊕ Die Anschaffungskosten sind vergleichsweise niedrig.
- ⊕ Es ist eine verhältnismäßig kleine Leistung nötig, da nur die Beheizung des Aufenthaltsbereiches angestrebt wird.
- ⊕ Die Wärmequelle genau dort, wo sie gebraucht wird, dadurch weniger Übertragungsverluste.
- ⊕ Keine Geräuschbelästigung.
- ⊖ Wer außerhalb der Kirchenbänke steht, friert.
- ⊖ Zugluft an den Rändern ist häufig.
- ⊖ Gefahr der Kondensation an den Wänden, Schmutz bleibt dort „kleben“ (Schwärzung!).
- ⊖ Strom ist bezogen auf den Energieinhalt sehr teuer.
- ⊖ Abgesehen davon ist es gesamtenergetisch betrachtet nicht sinnvoll, „edlen“ Strom wieder in Wärme umzuwandeln.
- ⊖ Je nach Modell sind Bankheizungen mehr oder weniger sichtbar.

6.5 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Was kann aus der Vielfalt der vorgestellten Ergebnisse geschlossen werden?

In erster Linie, dass es nicht DIE Kirchenheizung gibt, die in allen Fällen die besten Ergebnisse liefert. Für jede Kirche muss ihre eigene Lösung gefunden werden. Dabei ist eine Reihe von Aspekten zu beachten, wie in den folgenden vier Abschnitten beschrieben.

6.5.1 Die Ausstattung der Kirche

Sind es Fresken, die in der Kirche von Bedeutung sind, oder ist es der mittelalterliche Altar? Hat die Kirche eine bemalte Kassettendecke, ein feingeschnitztes Chorgestühl, ein wertvolles Kreuzifix, bedeutende Figuren aus Holz oder Stein? Geht es darum, bunte Kirchengläser aus dem Mittelalter zu erhalten? Oder die Stuckverzierungen und den Marmorschmuck? Die Ansprüche all dieser Ausstattungsstücke - die Gebäudehülle selbst mit eingeschlossen - an das Raumklima sind unterschiedlich, und in jeder Kirche werden sich deshalb anders gewichtete Anforderungen ergeben. Die Bewertungsmatrix in Abschnitt 6.3.3 sowie die ausführlicheren Erklärungen in Abschnitt 2.3 können bei der Bestimmung der spezifischen Anforderungen der Kirche eine Hilfe sein.

Außerdem wird die Ausstattung in manchen Fällen auch dem Einbau der Heizung Grenzen setzen. Bei einem historischen Bodenbelag, der erhalten werden soll, gestaltet sich der Einbau einer Fußbodenheizung sehr aufwändig, sofern er überhaupt möglich ist. Auch die Spuren einer Vorgängerkirche unter der bestehenden können zu Konflikten beim Verlegen von Fußbodenheizungen, aber auch von Luftkanälen, führen - wenn sie aus archäologischer Sicht auch vielleicht von Interesse sind. Das Anbringen einer Bankheizung im historischen Chorgestühl ist u.U. nicht ohne physische Schäden am Objekt realisierbar. Hinweise hierzu sind in Abschnitt 6.4 bei der Kurzbeschreibung der Systeme gesammelt.

6.5.2 Die Nutzung der Kirche und Erwartungen der Kirchengemeinde

Wird die Kirche täglich genutzt oder nur an Sonntagen? Finden auch Konzerte in der Kirche statt oder andere kulturelle Veranstaltungen? Und welchen Stellenwert hat die Behaglichkeit in der Kirche für die Pfarrgemeinde? Die Erwartungen an das Klima in der Kirche variieren zum Teil stark - während

in der Dorfkirche im alpinen Seitental 8°C durchaus Zufriedenheit hervorrufen können, sind Gläubige in den Niederlanden eher an 15–20°C gewöhnt. Und in der Wallfahrtskirche wird man eher eine kontinuierliche Lösung anstreben (die im Betrieb günstig ist, um den Kostenaspekt mit herein zu nehmen), während in der Kapelle, die an wenigen Wochenenden im Jahr für Hochzeiten genutzt wird, eine Lösung interessant ist, die kurzfristig akzeptable Behaglichkeit schafft, ohne dem Raum zu schaden (und in der Anschaffung nicht zu teuer ist) - um zwei Extrembeispiele zu nennen. Schließlich bedeutet die Nutzung in gewisser Hinsicht auch eine „Belastung“ des Gebäudes - durch eingebrachte Wärme, Feuchtigkeit und Schmutz -, auf die mit dem richtigen Heizungssystem positiv reagiert werden sollte.

Kontinuierliches Heizen schafft mit ausgeglicheneren Luft- und Oberflächentemperaturen in der Regel höhere Behaglichkeit, andererseits schaffen Heizungssystem mit größerem Strahlungsanteil unter Umständen sehr schnell und ohne nennenswerte Beeinflussung der Lufttemperatur eine Verbesserung des thermischen Empfindens. Hilfestellung beim Formulieren und Abwägen der Ziele können die Ausführungen in Abschnitt 2.1 und 2.2 sowie die Bewertungsmatrizen in Abschnitt 6.3.3 geben.

6.5.3 Das Ortsklima sowie Architektur und Größe der Kirche

Das Außenklima - im Sinne des Jahresverlaufs von Temperatur, und insbesondere Feuchtigkeit, aber auch Sonneneinstrahlung und Windexponiertheit - stellt die Rahmenbedingungen: Aus der mittleren absoluten Feuchtigkeit im Winter ergibt sich die maximale Raumtemperatur (siehe Abschnitt 6.3.1), Taupunkt und Temperatur - zusammen mit der thermischen Trägheit des Gebäudes - zeigen die Notwendigkeit einer Grundtemperierung zur Vermeidung von Kondensation nach gut besuchten Gottesdiensten und im Frühjahr auf, Sonneneinstrahlung und Windexponiertheit - zusammen mit der Größe der Fensterflächen und Dichtheit des Gebäudes - verlangen nach mehr oder weniger Regelbarkeit einer potenziellen Heizung.

Je größer die Kirche, desto aufwändiger wird es, sie zur Gänze zu beheizen. Je kleiner der Luftaustausch, desto genauer müssen Feuchteinträge kontrolliert werden. Bei Einfachverglasung sind Temperatur und relativer Feuchtigkeit, auch wenn sie über eine Vollklimaanlage geregelt würden, bauphysikalische Grenzen gesetzt. Hinweise hierzu sind in Abschnitt 6.4 bei der Kurzbeschreibung der Systeme gesammelt.

6.5.4 Die bisher aufgetretenen Schäden

Sind bisher schon Schäden aufgetreten? Wenn nein, sollte das „historische“ Raumklima, an das sich die Ausstattung anscheinend gut angepasst hat, möglichst nicht verändert werden. Da in den meisten Fällen die relative Feuchtigkeit der kritische Parameter ist, sollten sowohl Temperatur als auch Feuchtigkeit, wenn möglich, über ein Jahr gemessen werden, um daraus sowohl das richtige Niveau als auch die verträgliche Schwankungsbreite zu ermitteln (siehe Abschnitt 2.3.6 und Anhang A.3). Bei Anpassungen des Raumklimas, die im Rahmen dieser Zielwerte bleiben, hält sich das Schadensrisiko in Grenzen. Das Raumklima kann jedenfalls verbessert werden, indem Störungen (wie z.B. Tagesschwankungen, Fluktuationen, rasche Veränderungen, Gradienten) abgemildert oder vermieden werden. Das Einstellen musealer Raumklimawerte ist hingegen nicht ohne Einschränkung wünschenswert.

Wurden hingegen schon Schäden beobachtet, können richtig gewählte Veränderungen die Situation verbessern. Wichtig, vielleicht sogar noch wichtiger als im ersten Fall, ist hier die Aufnahme des Raumklimas über zumindest ein Jahr mit einer den vermuteten Problemstellen angepassten Messtechnik und eine Analyse im interdisziplinären Team, welche auch die Baugeschichte einschließt, und so alle möglichen Schadensfaktoren, auch über die Heizungsanlage hinaus, ins Auge fasst. Oft ist es ein Bündel von Maßnahmen, die zu den Schäden geführt haben (wie etwa Arendt [1986, 1989] anschaulich am Beispiel des Münster Ingolstadt aufzeigt). Für die Beurteilung des Raumklimas eignen sich z.B. die Visualisierung typischer Temperaturverläufe (siehe Abschnitt 4.1.3 und 4.2), die Berechnung von Kennwerten (Abschnitt 4.1.4 und 4.3) sowie die in Abschnitt 6.1.4 vorgestellte, von Camuffo [2007] benutzte Darstellung der täglichen Schwankungen der relativen Feuchtigkeit über den täglichen Temperaturschwankungen. Die Entscheidungsfindung kann in solchen Fällen auch eine dynamische Simulation, wie in Abschnitt 5 (insbesondere im Fallbeispiel in Abschnitt 5.4), aber auch von Schellen [2002] beschrieben, unterstützen.

Besonders hingewiesen sei an dieser Stelle auf das Problemfeld der Salze im Mauerwerk. Sind derlei Schäden sichtbar oder besteht der Verdacht auf Salzbelastung im Mauerwerk, kann eine genaue Analyse der Salze und ihrer Phase fortschreitende oder neue Schäden oft vermeiden, indem wiederholte Schwankungen um die Deliqueszenzfeuchte oder die Phasengrenzen bei hydratbildenden Salzen vermieden wer-

den. Wie in Abschnitt 2.3.5 dargestellt gibt es keine generell „sicheren“ Bereiche: Sie hängen von den jeweils vorkommenden Salzkombinationen ab. Spezifische Grenzwerte finden sich in der Literatur ([Price, 2000; Steiger, 1994; Steiger u. Dannecker, 1995, 1998; Steiger u. a., 1998; Steiger, 2000]) und zum Teil auch in Abschnitt 2.3.5 und im Anhang A.2.

6.5.5 Abschließend

Durch die Betrachtung all dieser Aspekte wird sich nicht nur die Anzahl der in Frage kommenden Heizungssysteme reduzieren, es ergeben sich auch kirchenspezifische Eckwerte für den Betrieb der Heizung, wie z.B. eine Präferenz für kontinuierliches Heizen oder kurzfristige Ereignisse mit möglichst geringer Beeinflussung des Raumklimas, das Zielniveau der relativen Feuchtigkeit aus der Betrachtung des bisherigen Raumklimas, die maximale Nutzungstemperatur aus der Analyse des Außenklimas und der gewünschten relativen Feuchtigkeit usw..

Die Heizweise (kontinuierlich oder für die Gottesdienste) und deren etwaige Regelung samt dazugehörigen Kennwerten ist oft bestimmender als das Heizungssystem selbst, und zwar sowohl für die Behaglichkeit als für die Denkmalpflege. Ebenso müssen die Kosten differenziert und, wenn möglich, auf gleichen Nutzen bezogen betrachtet werden: Eine (schlecht eingestellte) Luftheizung, aktiviert für die Gottesdienste, heizt im Wesentlichen das oberste Drittel der Kirche, ruiniert dort mit hohen Temperaturen und niedriger relativer Feuchte Kassettendecke und Orgel, während im Sockelbereich durch die ständigen Kondensationszyklen Salze florieren und das Heizen im Bankbereich doch den Gläubigen überlassen ist (siehe Abschnitt 5.4.1). Die Betriebskosten sind in der Regel geringer als bei einer Luftheizung mit stationärer Grundtemperatur. Diese hat aber ein wesentlich geringeres Temperaturprofil über der Höhe, vermeidet Feuchtigkeitseinbrüche sowie Kondensation und bietet den Besuchern durch höhere Oberflächentemperatur mehr Behaglichkeit. Besser als weniger Geld für Schäden und keinen Nutzen auszugeben, scheint es doch einen etwas höheren Betrag für weniger Schäden und ein Minimum an Nutzen anzulegen.

Bei unachtsamer oder fahrlässiger Auswahl und Handhabung kann die Beheizung von Kirchen wertvolles Gut unwiederbringlich zerstören. Mit Umsicht gewählt, kann die Heizung in Kirchen sowohl den Erwartungen der Kirchenbesucher entgegen kommen, als auch zum Erhalt unseres historischen und kultu-

rellen Erbes beitragen.

Literaturverzeichnis

- [Albrecht u. a. 2000] ALBRECHT, Peter ; BALZ, M. ; BAUERMANN, Klaus ; GEITL, Rainer ; MENGER, Reinhardt: Kirchenheizung und Orgel. [Merkblatt der Evang. Kirche in Hessen und Nassau, 1997]. In: *Ars Organi* 48 (2000), Nr. 1, S. 42–44
- [Andjulovici 1995] ANDJULOVICI, Alexei: Eine außergewöhnliche Heizungsanlage. In: *TAB Technik am Bau* (1995), 12, S. 75–79
- [Arendt 1976a] ARENDT, Claus: *Heizung (Kirchenheizung)*. München : Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, 1976
- [Arendt 1976b] ARENDT, Claus: Kirchenheizung und Denkmalschutz. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 27 (1976), 12, S. 435–441
- [Arendt 1983a] ARENDT, Claus: Kirchenheizung. In: *Denkmalpflege Informationen, Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege* (1983), Nr. 36, Mai
- [Arendt 1983b] ARENDT, Claus: *Trockenlegung*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1983
- [Arendt 1986] ARENDT, Claus: Heizung in historischen Sälen. In: *Deutsche Bauzeitung* (1986), Heft 9, S. 86–104
- [Arendt 1989] ARENDT, Claus: Kirchenheizung - oder die Beheizung großer Räume alter Bauart. In: *Deutsches Architektenblatt* (1989), Heft 7, S. 1063–1068
- [Arendt 1993] ARENDT, Claus: *Raumklima in großen historischen Räumen : Heizungsart, Heizungsweise, Schadensentwicklung, Schadensverhinderung*. Köln : Müller, 1993 -4
- [Arendt 1994] ARENDT, Claus: *Technische Untersuchungen in der Altbausanierung*. Köln : Müller, 1994 -0
- [Arendt 1996] ARENDT, Claus: Die gesunde Wand als Voraussetzung einer Freskusanierung. In: *Salzschäden an Wandmalereien. Arbeitsheft des Bayrischen Landesamtes für Denkmalpflege*. München : Lipp, 1996 8, S. 15–28
- [Arendt u. Hausladen 1992] ARENDT, Claus ; HAUSLADEN, G.: Thermische Bausanierung. Vom Sinn und Unsinn einer amtlichen Empfehlung zur Beheizung und Trockenlegung von Gebäuden. In: *Haustechnische Rundschau* (1992), Heft 2, Februar
- [Arendt u. Seele 2000] ARENDT, Claus ; SEELE, Jörg: *Feuchte und Salze in Gebäuden*. Leinfelden-Echterdingen : Alexander Koch, 2000

- [Arnold 1981] ARNOLD, Andreas: Salzminerale in Mauerwerken. In: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* (1981), 61, S. 147–166
- [Arnold u. a. 1989] ARNOLD, Andreas ; ZEHNDER, Konrad ; KÜNG, Andreas: Verwitterung und Erhaltung von Wandmalerei. In: SCHWEIZER, F. (Hrsg.): *Methode zur Erhaltung von Kulturgütern*. Bern : Schweizer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, 1989, S. 63–70
- [Arnold u. a. 1996] ARNOLD, Andreas ; ZEHNDER, Konrad ; KÜNG, Andreas ; EMMENEGGER, Oskar: Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Münstair. In: *Salzschäden an Wandmalereien. Arbeitsheft des Bayerischen Landsamtes für Denkmalpflege*. München : Lipp, 1996 8, S. 7–9
- [ASHRAE 1993] *Kapitel* Chapter 8 Physiological Principles and Thermal Comfort. In: ASHRAE: *Fundamentals Handbook*. 1993, S. 8.1 – 8.29
- [Bauer 1981] BAUER, Wilhelm P.: Sicherheitsmaßnahmen bei der Entlehnung denkmalgeschützter Objekte. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 53–65
- [Baumann u. a. 1998] BAUMANN, Ernst ; ZEHNDER, Konrad ; RÜEGG, Thomas: Beheizen von Kirchen. Gratwanderung zwischen Komfortanspruch und Schäden - Fallbeispiel der Kathedrale Chur. In: *Schweizer Ingenieur und Architekt* (1998), 18 April, S. 307–312
- [Beck u. Koller 1981] BECK, Walter ; KOLLER, Manfred: Probleme der Heizung in historischen Bauwerken Österreichs. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 79–102
- [Bernardi u. a. 2005] BERNARDI, Adriana ; BECHERINI, Francesca ; BASSATO, Giuseppe ; BELLIO, Maura: Do protective glazing systems enhance the thermo-hygrometric stress of stained glass windows? In: *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro* 35 (2005), Nr. 3, S. 25–31
- [Bernardi u. a. 2006] BERNARDI, Adriana ; BECHERINI, Francesca ; BASSATO, Giuseppe ; BELLIO, Maura: Condensation on ancient stained glass windows and efficiency of protective glazing systems: two French case studies, Saint-Chapelle (Paris) and Saint-Urbain Basilica (Troyes). In: *Journal of Cultural Heritage* (2006), Nr. 7, S. 71–78
- [Bordass u. Bemrose 1996] BORDASS, William ; BEMROSE, Colin: *Heating your Church*. London : Church House Publishing, 1996
- [Bratasz u. a. 2005] BRATASZ, Łukasz ; JAKILEA, Slawomir ; KOZŁOWSKI, Roman: Allowable thresholds in dynamic changes of microclimate for wooden cultural objects: monitoring in situ and modelling. In: *ICOM*

- Committee for Conservation, 14th Triennial Meeting The Hague Preprints, Vol II*, James & James, 2005, S. 582–589
- [Bratasz u. a. 2007] BRATASZ, Łukasz ; KOZŁOWSKI, Roman ; CAMUFFO, Dario ; PANGAN, Emanuela: Impact of indoor heating on painted wood: Monitoring the altarpiece in the church of santa Maria Maddalena in Rocca Pietore, Italy. In: *Studies in Conservation* 52 (2007), Nr. 3, S. 199–210
- [Camuffo 1998] CAMUFFO, Dario: *Microclimate for Cultural Heritage*. Amsterdam : Elsevier Science B.V., 1998
- [Camuffo 2007] CAMUFFO, Dario (Hrsg.): *Church Heating and the Preservation of the Cultural Heritage*. Milano : Mondadori Electa, 2007
- [Charola u. Weber 1992] CHAROLA, A. Elena ; WEBER, Johannes: The hydration-dehydration mechanism of sodium sulphate of Stone, 2. In: DELGADO RODRIGUES, J. (Hrsg.) ; HENRIQUES, F. (Hrsg.) ; JEREMIAS, T. (Hrsg.): *VII International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lisbon, 1992, S. 581–590
- [Clasen 1991] CLASEN, Eige: Beheizung von Kirchen durch Gas-Infrarot-Strahlungsheizung. In: *Erhalten historischer Bauten. Tagung Köln, 23. und 24. April 1991*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1991, S. 69–94
- [Cummings u. a. 1998] CUMMINGS, K. ; LANFORD, W.A. ; FELDMANN, M.: Weathering of glass in moist and polluted air. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* (1998), Nr. 136-138, S. 858–862
- [Diakumaku u. a. 1995] DIAKUMAKU, Evgenia S. ; GORBUSHINA, Anna ; KRUMBEIN, Wolfgang E. ; PANINA, Ludmila ; SOUKHARJEVSKI, S.: Black fungi in marble and limestones - an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments. In: *The Science of the Total Environment* 167 (1995), S. 295–304
- [DIN EN 15757 (Entwurf) 2008] DIN EN 15757 (ENTWURF): *Erhaltung des kulturellen Erbes - Vorgaben für Temperatur und relative Feuchte zur Reduzierung von klimabedingter mechanischer Beschädigung in organischen hygroskopischen Materialien*. Berlin : Beuth, 2008
- [DIN EN 15759 (Entwurf) 2008] DIN EN 15759 (ENTWURF): *Spezifikation und Kontrolle des Raumklimas - Beheizung von Kirchen*. Berlin : Beuth, 2008
- [DIN EN ISO 7730:1995 1995] DIN EN ISO 7730:1995: *Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit*. Berlin : Beuth, 1995
- [Dornieden u. a. 2000] DORNIEDEN, Thomas ; GORBUSHINA, Anna ; KRUMBEIN, Wolfgang E.: Biodecay of cultural heritage as a space/time-related

- ecological situation - an evaluation of a series of studies. In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 46 (2000), S. 261–270
- [Drachenberg u. Müller 1993] DRACHENBERG, Erhard ; MÜLLER, Wolfgang: Mittelalterliche Glasmalerei. In: BACHER, Ernst (Hrsg.) ; ICOMOS international committee on stained glass (Veranst.): *Stained Glass*. Sri Lanka : National Committee of ICOMOS, 1993, S. 98–111
- [Dulosy 1981] DULOSY, Ede: Kirchenheizung - Untersuchung der allgemeinen Problematik. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 132–153
- [Duttlinger u. Knöfel 1993] DUTTLINGER, Werner ; KNÖFEL, Dietbert: Salzkristallisation und Salzsadenschadensmechanismen. In: *Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung*. Berlin : Ernst & Sohn, 1993, S. 197–213
- [Egger 1981] EGGER, Lambert: Der Einsatz von Kunststoff-Flächenheizleitern für die Beheizung von Kirchen. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 103–105
- [Ende 1966] ENDE, Gustav: Die elektrische Speicherheizung in Schulen und Kirchen. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 17 (1966), Heft 9, S. 337–344
- [Ensink 1994] ENSINK, Hermann: Neue Wege in der Beheizung von Kirchen und "Gebäuden alter Bauart". In: *TAB Technik am Bau* (1994), 6, S. 61–64
- [Fanger 1970] FANGER, P. Ole: *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Copenhagen : Danish Technical Press, 1970
- [Fine u. a. 1999] FINE, Philip M. ; CASS, Glen R. ; R.T., Simoneit B.: Characterization of fine particle emissions from Burning Church Candles. In: *Environmental Science and Technology* 33 (1999), S. 2352–2362
- [Fitzner 1986] FITZNER, Klaus: Luftführung in klimatisierten Sälen. In: *Klima - Kälte - Heizung* (1986), Heft 3, S. 93–98
- [Fitzner 1996] FITZNER, Klaus: Energetisch günstige Abluft-Kanäle und -Öffnungen. In: *HLH Heizung Lüftung Haustechnik* 10 (1996), S. 52–56
- [Fluent 1999] FLUENT: *Fluent 5 User's Guide*. Lebanon, New Hampshire: Fluent, April 1999
- [Fluent 2000] FLUENT: *Fluent Release 5.3*. Fluent : Lebanon, New Hampshire, 2000
- [Franz 1966] FRANZ, Dieter: Elektro-Speicherheizungen in kirchlichen Anlagen. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 17 (1966), Heft 9, S. 353–355

- [Franzen 2002] FRANZEN, Christoph: *Historische Bauwerksteine in Südtirol. Verteilung und Verwitterungsverhalten*, Universität Innsbruck, Diss., 2002
- [Frenzel 1981] FRENZEL, Gottfried: Probleme der Restaurierung, Konservierung und prophylaktischen Sicherung mittelalterlicher Glasmalereien. In: *Kunstspiegel* 3 (1981), Heft 3, S. 173–209
- [Frenzel 1993a] FRENZEL, Gottfried: Probleme der Restaurierung, Konservierung und prophylaktischen Sicherung mittelalterlicher Glasmalereien. In: BACHER, Ernst (Hrsg.) ; ICOMOS international committee on stained glass (Veranst.): *Stained Glass*. Sri Lanka : National Committee of ICOMOS, 1993, S. 238–257
- [Frenzel 1993b] FRENZEL, Gottfried: The Restoration of Medieval Stained Glass. In: BACHER, Ernst (Hrsg.) ; ICOMOS international committee on stained glass (Veranst.): *Stained Glass*. Sri Lanka : National Committee of ICOMOS, 1993, S. 74–82
- [Frey u. a. 1994] FREY, Konrad ; HAAS, Johannes ; KÖNIGHOFER, Kurt: *Handbuch für Energieberater*. 2. Aktualisierung. Graz : Joanneum Research, 1994
- [Gagge u. a. 1986] GAGGE, A. Pharo ; FOBELETS, A.P. ; BERGLUND, Larry G.: A standard predictive index of human response to the thermal environment. In: *ASHRAE transactions* 92 (1986), S. 709–731
- [Gossens 1972] GOSENS, Heinz: Der Einfluß des Raumklimas auf Menschen und Kunstwerke in Kirchen. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 25 (1972), Heft 4, S. 259–263
- [Grassegger 1997] GRASSEGGER, Gabriele: Die Verwitterung von Naturstein an Bauten und Baudenkmalern. In: V, Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerks e. (Hrsg.): *Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege*. Ulm, 1997, S. 433–489
- [Gröber 1934] GRÖBER, Heinz: *Rietschels Leitfaden der Heiz- und Lüftungstechnik*. Berlin : Springer, 1934
- [Gröber u. Sieler 1935] GRÖBER, Heinz ; SIELER, W.: Wärmebedarfsbestimmung von Kirchen. In: *Beihefte zum Gesundheitsingenieur* (1935), Reihe 1, Heft 35
- [Grosskinsky u. Riedl 1999] GROSSKINSKY, Theo ; RIEDL, G.: Feuchtetechnische Untersuchungen und Klimamessungen an der Pfarrkirche St. Nikolaus in Mühlendorf. / Fraunhofer Institut für Bauphysik. 1999. – Bericht FEB-8/1998

- [Haupt 2001] HAUPT, Wolfram: *Zur Simulation von auftriebsinduzierten Innenraumströmungen*. Universität Kassel, Diss., 2001
- [Hennings 1966] HENNINGS, F.: Probleme der Kirchenheizung. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 17 (1966), Heft 9, S. 321–326
- [Hofbauer u. a. 2005] HOFBAUER, Wolfgang ; BREUER, Klaus ; TSCHAIKNER, A. ; KRUS, Martin ; SEDLBAUER, Klaus ; SCHOCH, T.: Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen - materialspezifische Wachstumsisoplethen. In: *IBP-Mitteilung* 32 (2005), Nr. 457
- [Hungerbühler 1994] HUNGERBÜHLER, Erwin: Dimensionierung, Sanierung und Betrieb von Elektroheizungen in Kirchen. / Bundesamt für Konjunkturfragen, Schweiz. 1994. – Forschungsbericht
- [Israelachivi 1992] ISRAELACHIVI, Jakob N.: *Intermolecular and Surface Forces*. London : Academic Press, 1992
- [Jakięła u. a. 2007a] JAKIEŁA, Sławomir ; BRATASZ, Łukasz ; KOSŁOWSKI, Roman: Acoustic Emission for Tracing the Evolution of Damage in Wooden Objects. In: *Studies in Conservation* 52 (2007), Nr. 2, S. 101–109
- [Jakięła u. a. 2007b] JAKIEŁA, Sławomir ; BRATASZ, Łukasz ; KOZŁOWSKI, Roman: Numerical modeling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. In: *Wood Science and Technology* online first, DOI 10.1007/s00226-007-0138-5 (2007)
- [Jenisch 1972] JENISCH, Richard: Bauphysik und Heizung. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 25 (1972), Heft 4, S. 263–269
- [Kämpf u. Clasen 1995] KÄMPF, Andreas ; CLASEN, Eige: Kirchen mit Gasinfrarotstrahlern beheizen. In: *TAB Technik am Bau* (1995), 8, S. 29–36
- [Kanne 1964] KANNE, Ludwig A.: Warmluftheizung der Kirche Hatzum (Ostfriesland) mit Nachtstrom-Wärmespeicherblock. In: *Gesundheitsingenieur* 85 (1964), Heft 10, S. 307–312
- [Kanne 1966] KANNE, Ludwig A.: Neuartige Elektro-Warmluftheizungs- und Lüftungsanlage in der Kirche Brünen. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 17 (1966), 9 September, S. 348–352
- [Kilian 2004] KILIAN, Ralf: *Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim. Auswirkungen auf das Raumklima*. München : Anton Siedl, 2004
- [Kilian u. a. 2005] KILIAN, Ralf ; SEDLBAUER, Klaus ; KRUS, Martin: Klimaanforderungen für Kunstwerke und Ausstattung historischer Gebäude. In: *IBP-Mitteilung* 32 (2005)

- [Kilian u. a. 2007] KILIAN, Ralph ; KRUSE, Martin ; SEDLBAUER, Klaus: Prevention of mould growth and moisture related damages on indoor cultural heritage by a suitable temperature and humidity regulation strategy. In: DRDACKY, Milos (Hrsg.) ; CHAPUIS, Michel (Hrsg.): *Safeguarded Cultural Heritage. Volume 2 - Posters*. 7th European Conference SSAVEUR", 31st-3rd June 2006, Prague : ITAM, 2007, S. 810–812
- [Kleinmanns 1996] KLEINMANNS: *Titel zu prüfen*. Verlag zu prüfen, 1996
- [Klumner 1981] KLUMNER, Gottfried: Klimafaktoren in geschlossenen Räumen. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 66–78
- [Koller 1981] KOLLER, Manfred: Klima und Sicherheit in Ausstellungen. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 106–122
- [Kori 1924] KORI, H.: Die Berechnung der Kirchenheizung nach der Riet-schelschen Formel. In: *Gesundheitsingenieur* 47 (1924), Nr. 21, S. 1
- [Korn 1993] KORN, Ulf-Dietrich: Ursachen und Symptome des Zerfalls mittelalterlicher Glasgemälde. In: BACHER, Ernst (Hrsg.) ; ICO-MOS international committee on stained glass (Veranst.): *Stained Glass*. Sri Lanka : National Committee of ICOMOS, 1993, S. 57–73
- [Kotterer u. a. 2004] KOTTERER, Michael (Hrsg.) ; GROSSESCHMIDT, Henning (Hrsg.) ; BOODY, Frederick (Hrsg.) ; KIPPES, Wolfgang (Hrsg.): *Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung*. Bd. Band 9. Schloss Schönbrunn Kultur- und Betriebsges., 2004
- [Kozłowski 2000] KOZŁOWSKI, Roman: Microclimate in the Historic Wooden Church in Debno Podhalanskie. In: *Biuletyn Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki* 11 (2000), Nr. 4, S. 96–99
- [Kozłowski u. Bratasz 2003] KOZŁOWSKI, Roman ; BRATASZ, Łukasz: *Friendly Heating*. URL: http://www.heritage.xtd.pl/friendly_heating.html, 2003. – accessed on 20.06.2003
- [Krischer u. Kast 1957] KRISCHER, O. ; KAST, W.: Zur Frage des Wärmebedarfs beim Anheizen selten beheizter Gebäude. In: *Gesundheitsingenieur* (1957), Heft 21/22, S. 321–352
- [Krätz 1961] KRÄTZ, H.: Heizung und Lüftung der neuen Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche in Berlin. In: *Gesundheitsingenieur* 82 (1961), Heft 3, S. 86–88
- [Künzel 1998] KÜNZEL, Helmut: Kirchenheizung - Was ist zu beachten? In: *IBP-Mitteilungen* 25 (1998), Nr. 341
- [Künzel u. Holz 1991] KÜNZEL, Helmut ; HOLZ, Dieter: Richtiges Heizen in historischen Gebäuden. In: *Erhalten historischer Bauten. Tagung Köln, 23. und 24. April 1991*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1991, S. 121–138

- [Künzel u. Holz 1992] KÜNZEL, Helmut ; HOLZ, Dieter: *Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten und beheizten Gebäuden alter Bauart. A. Bauphysikalische Grundlagen und generelle Zusammenhänge über die Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf Grund von Langzeituntersuchungen.* Stuttgart : IRB Verlag, 1992
- [Landesinstitut für Statistik - ASTAT 1999] LANDESINSTITUT FÜR STATISTIK - ASTAT (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch für Südtirol.* Autonome Provinz Bozen/Südtirol, 1999
- [Larsen 2002] LARSEN, Poul K.: Rumklimaets inflydelse på kirkens skatte. In: *Danvak Magasinet* (2002), 6/7, S. 28–31
- [Laue 2000] LAUE, Steffen: The 'Grottensaal' of the new Palace in Potsdam, Germany - Investigations for a conservation concept. In: RAMMLMAIR, D. (Hrsg.) ; MEDERER, J. (Hrsg.) ; OBERTHÜR, T. (Hrsg.) ; HEIMANN, R. B. (Hrsg.) ; PENTINGHAUS, H. (Hrsg.): *Applied Mineralogy in Research, Economy, Technology, Ecology and Culture.* Rotterdam : Balkema, 2000, S. 1017–1020
- [Lefèvre u. a. 2005] LEFÈVRE, Roger ; IONESCU, Anda ; AUSSET, Patrick ; CACHIER, Helène ; CHABAS, Anne ; FAVEZ, Oliver ; LOMBARDO, Tiziana ; OIKONOMOU, Konstantina: In the field experimental simulation using glass soiling sensors and modelling of the atmospheric particles deposition on stained-glass windows with protective double-glazing. In: *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro* 35 (2005), Nr. 3, S. 41–48
- [Leisse 2002] LEISSE, Bernhard: *Holzbauteile richtig geschützt. Langlebige Holzbauten durch konstruktiven Holzschutz.* Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 2002
- [Lengweiler 2000] LENGWEILER, Philip: *Modeling Deposition and Resuspension of Particles on and from Surfaces.* Zürich, ETH Zürich, Diss., 2000
- [Limpens-Neilen 2006] LIMPENS-NEILEN, Dionne: *Bench Heating in Monumental Churches . Thermal Performance of a Prototype,* Technische Universiteit Eindhoven, Diss., 2006
- [Limpens-Neilen u. a. 2004a] LIMPENS-NEILEN, Dionne ; SCHOFFELEN, Marielle ; SCHELLEN, Henk: Design study of a local bench heating system for churches, performed by computer simulation. In: *Proceedings of the 21st Conference Plea2004.* Eindhoven, The Netherlands, September 2004, S. 799–803
- [Limpens-Neilen u. a. 2005] LIMPENS-NEILEN, Dionne ; SCHOFFELEN, Marielle ; SCHELLEN, Henk L.: The influence of a local heating system on the indoor climate of a large room. In: *Nordic Building Physics Symposium 2005.* Reykjavik, Iceland, 2005
- [Limpens-Neilen u. a. 2004b] LIMPENS-NEILEN, Dionne ; SCHOFFELEN, M.E.A. ; SCHELLEN, Henk: Thermal performance of a local bench heating system for

- churches. In: *Proceedings of the Roomvent 2004 conference*. Coimbra, Portugal, 2004
- [Lubelli 2006] LUBELLI, Barbara: *Sodium chloride damage to porous building materials*, Technische Universiteit Delft, Diss., 2006
- [Lubelli u. a. 2005] LUBELLI, Barbara ; HEES, Rob P. ; GROOT, Caspar W.: Investigation on the behaviour of a restoration plaster applied on heavy salt loaded masonry. In: *Construction and Building Materials* (2005)
- [Mainz 1973] MAINZ: Richtlinien für die Beheizung von Kirchen. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 26 (1973), Heft 1/2, S. 94–97
- [Marschner 1993] MARSCHNER, Hannelore: Untersuchungen zur Verwitterung und Konservierung mittelalterlicher Glasmalerei. In: BACHER, Ernst (Hrsg.) ; ICOMOS international committee on stained glass (Veranst.): *Stained Glass*. Sri Lanka : National Committee of ICOMOS, 1993, S. 203–217
- [Mayer 1981] MAYER, Gabriel: Konservierung und Restaurierung mittelalterlicher Glasmalereien. Ein Plädoyer für Sicherung und gegen zu weit gehende Restaurierung. In: *Kunstspiegel* 3 (1981), Heft 3, S. 245–250
- [Mecklenburg u. a. 1998] MECKLENBURG, Marion F. ; TUMOSA, Charles S. ; ERHARDT, David: Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity. In: DORGE, Valerie (Hrsg.) ; HOWLETT, F. Carey (Hrsg.): *Painted Wood: History and Conservation*. Los Angeles, 1998, S. 464 – 483
- [Metzkow 1924] METZKOW, K.N.: Die Berechnung des Wärmebedarfs für Kirchen. In: *Gesundheitsingenieur* 47 (1924), Nr. 42
- [Nazaroff u. a. 1992] NAZAROFF, William W. ; LIGOCKI, Mary ; SALMO, Lynn G. ; CASS, Glen R. ; FALL, Teresa ; JONES, Michael C. ; LIU, Harvey I. H. ; MA, Timothy ; BERLAND, Dinah (Hrsg.): *Airborne Particles in Museums*. Los Angeles : The J. Paul Getty Trust, 1992 (Research in conservation) 0–89236–187–5
- [Oellermann 1981] OELLERMANN, Eike: Wartungsverträge für Kircheninventar - praktizierte Denkmalpflege. In: *Restauratorenblätter* (1981), Band 5, S. 123–131
- [Olstad u. Haugen 1997] OLSTAD, Tone M. ; HAUGEN, Annika: Klima i stavkirker. Lokal klimatisering av menigheten in Kaupanger stavkirke, Sogndal Komune / NIKU Norsk institutt for Kulturminneforskning. Oslo, november 1997 (004). – Fagrapport

- [Padfield 1998] PADFIELD, Tim: *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity*, The Technical University of Denmark, Diss., October 1998
- [Pallot-Frossard u. a. 2005] PALLOT-FROSSARD, Isabelle ; BERNARDI, Adriana ; VAN GRIEKEN, René ; RÖLLEKE, Sabine ; VERITÀ, Marco: Main conclusions from VIDRIO EU Research programme on the determination of conditions to prevent weathering of ancient stained glass windows and recommendations for end-users and practitioners. In: *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro* 35 (2005), Nr. 3, S. 75–83
- [Patankar u. Spalding 1972] PATANKAR, SuhasV. ; SPALDING, D. Brian: A Calculation procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flow. In: *Int. J. Heat Mass Transfer* 15 (1972), S. 1787–1806
- [Pescoller 1999] PESCOLLER, Markus: Klimamessung Pfarrkirche Karneid 1991 / Maler- und Restauratorenwerkstätte Gebr. Pescoller. Bruneck, 1999. – Untersuchungsbericht
- [Pfeil 1975] PFEIL, Axel: *Kirchenheizung und Denkmalschutz; Wärmebedarf, Feuchtehaushalt, Heizungssysteme*. Wiesbaden und Berlin : Bau-Verlag, 1975
- [Price 2000] PRICE, Clifford: *An Expert Chemical Model for the Determining the Environmental Conditions Needed to prevent Salt Damage in Porous Materials. Protection and Conservation of the European Cultural Heritage*. London : Archetype Publications Ltd, 2000. – Research Report 11
- [Ranade 1987] RANADE, Madhav B.: Adhesion and Removal of Fine Particles on Surfaces. In: *Aerosol Science and Technology* 7 (1987), S. 161–176
- [Rauch 2004] RAUCH, Ivo: Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien. Eine Einführung in die Problematik. In: *Die Denkmalpflege* 62 (2004), S. 117 – 124
- [Römich 2004a] RÖMICH, Hannelore: Conservation of stained glass windows: the European VIDRIO project. In: *6th European Commission Conference on Sustaining Europe's Cultural Heritage*. London, 2004
- [Römich 2004b] RÖMICH, Hannelore: Evaluation of protective glazing systems. In: *Preservation Science* (2004), Nr. 1, S. 1–8
- [Rüngeler 1972] RÜNGELER, Peter: Anstrich, Putz und Heizung. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 25 (1972), Heft 4, S. 269–271

- [Sandler 2008] SANDLER, Martin: Leitfaden. Heizen in Kirchen / Energie für Gebäude. Kaufbeuren, 2008. – Firmenschrift
- [Schellen 2002] SCHELLEN, Henricus L.: *Heating Monumental Churches. Indoor Climate and Preservation of Cultural Heritage.*, Technische Universität Eindhoven, Diss., 2002
- [Schiedermaier u. Scherg 1991] SCHIEDERMAIER, Werner ; SCHERG, Jutta: *Denkmalfibel*. München : Callwey, 1991
- [Schlieder 1967] SCHLIEDER, Hans: Schäden an historischen Kirchenorgeln und anderen Kunstwerken. In: *Deutsche Kunst- und Denkmalpflege* 25 (1967), Heft 1, S. 20–37
- [Schmidt 1968] SCHMIDT, Karl H.: Die neuzeitliche Warmluftheizung für Kirchen. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 19 (1968), Heft 8, S. 278–283
- [Schmidt-Thomsen 1973] SCHMIDT-THOMSEN, Kurt: Denkmalpflege und Kirchenheizung. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 26 (1973), Heft 1/2, S. 88–94
- [Schmölzer 1936] SCHMÖLZER, A.: Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. In: *Chemie der Erde* 10 (1936), S. 479–520
- [Schneider 1994] SCHNEIDER, Anton: *Schädlinge und Schutz des Holzes*. Moers : U. Agst, 1994
- [Schoffelen u. a. 2004] SCHOFFELEN, Marielle ; LIMPENS-NEILEN, Dionne ; SCHELLEN, Henk: Measurement Set-up for the Verification of CFD Modeling Used in a Design Study for a Local Bench Heating System for Churches. In: *Proceedings of the 21st conference Plea2004*. Eindhoven, The Netherlands, September 2004
- [Schotes 1972] SCHOTES, Paul: Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 25 (1972), Heft 4, S. 257
- [Sedlbauer 2001] SEDLBAUER, Klaus: *Vorhersage von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen*, Universität Stuttgart, Diss., 2001
- [Sedlbauer u. a. 2002] SEDLBAUER, Klaus ; KRUS, Martin ; ZILLIG, Wolfgang: Vorhersagemodell zur Schimmelbildung bei instationärem Klima - Praktische Beispiel. In: *Architekten und Ingenieurtag. Bauphysik im Hochbau. 27.4.2002*. Nürnberg, 2002
- [Seele 1998a] SEELE, Jörg: Untersuchungsbericht und Gutachten zu den raumklimatischen Bedingungen und zur Wirkungsweise der Heizung. Aufkirchen, kathol. Pfarrkirche St. Johann Baptist 20.08.1998 / IGS Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH. 1998. – Untersuchungsbericht

- [Seele 1998b] SEELE, Jörg: Untersuchungsbericht und Gutachten zu den raumklimatischen Bedingungen und zur Wirkungsweise der Heizung. München, kath. Pfarrkirche St. Emmeram 30.07.1998 / IGS Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH. 1998. – Untersuchungsbericht
- [Seele 1998c] SEELE, Jörg: Untersuchungsbericht und Gutachten zu den raumklimatischen Bedingungen und zur Wirkungsweise der Heizung. Neuhaus, kath. Pfarrkirche 15.07.1998 / IGS Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH. 1998. – Untersuchungsbericht
- [Sieler 1938] SIELER, W.: Wärmebedarfsbestimmung von Kirchen (Eine neue Kirchenformel). In: *Beihefte zum Gesundheitsingenieur* (1938), Reihe I, Heft 38
- [Šijanec Zavrl u. a. 2006] ŠIJANEC ZAVRL, Marjana ; RAKUŠČEK, Andraž ; ŽARNIČ, Roko: Simulation of the Thermal Response of Heritage Buildings. In: RADIĆ, Jure (Hrsg.) ; RAJČIĆ, Vlatka (Hrsg.) ; ŽARNIĆ, Roko (Hrsg.): *Heritage protection - construction aspects. Proceedings of the International Conference of the ECTP in Dubrovnik, October 14-17 2006*, 2006, S. 531–538
- [Šijanec Zavrl u. Žarnič 2004] ŠIJANEC ZAVRL, Marjana ; ŽARNIČ, Roko: Thermal response of wall-tempered heritage buildings - monitoring and simulation. In: KOTTERER, Michael (Hrsg.) ; GROSSESCHMIDT, Henning (Hrsg.) ; BOODY, Frederick (Hrsg.) ; KIPPES, Wolfgang (Hrsg.): *Klima und Museen in historischen Gebäuden*, Schloss Schönbrunn Kultur- und Betriebsges., 2004
- [Snethlage u. Wendler 1997] SNETHLAGE, Rolf ; WENDLER, Eberhard: Moisture Cycles and Sandstone Degradation. In: BAER, N.S. (Hrsg.) ; SNETHLAGE, R. (Hrsg.): *Saving Our Architectural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Dahlem Workshop Report*. Baffins Lane : John Wiley & Sons, 1997, S. 7–24
- [Solar Energy Laboratory 2006a] SOLAR ENERGY LABORATORY: *TRNSYS 16. Volume 5. Mathematical Reference*. University of Wisconsin-Madison, 2006
- [Solar Energy Laboratory 2006b] SOLAR ENERGY LABORATORY: *TRNSYS 16. Volume 9. Weather Data*. University of Wisconsin-Madison, 2006
- [Sonntagsblatt 1996] SONNTAGSBLATT: *Debatte vom 3. Januar 1996: Frieren für die Kirchenkasse? Leser, Fachleute und Journalisten diskutieren*. website. www.sonntagsblatt.de/1997/1/1-deb.htm. Version: january 1996
- [Stadtmüller 1972] STADTMÜLLER, Peter A.: Orgel und Kirchenheizung. Kirchenheizung, Bericht und Ergebnis der Jahrestagung der Diözesanbaumeister und Baureferenten vom 24.5.-27.5.1972 in Mainz. In: *Das Münster* 25 (1972), Heft 4, S. 258–259

- [Steiger 1994] STEIGER, Michael: Crystallisation Properties of mixed salt systems containing chloride and nitrate. In: *Research on the Conservation of Brick Masonry Monuments. EC workshop*. 24-26 October 1994, Leuven, Belgium, 1994, S. 1–9?
- [Steiger 2000] STEIGER, Michael: Das Kristallisationsverhalten von Salzgemischen in historischen Baustoffen. In: SCHULZE, G. (Hrsg.) ; HORN, I. (Hrsg.): *Archäometrie und Denkmalpflege 2000*. Berlin : Mensch & Buch, 2000, S. 92–94
- [Steiger u. Dannecker 1995] STEIGER, Michael ; DANNECKER, Walter: Hygroskopische Eigenschaften und Kristallisationsverhalten von Salzgemischen. In: *Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung 5*. Berlin : Ernst & Sohn, 1995, S. 115–127
- [Steiger u. Dannecker 1998] STEIGER, Michael ; DANNECKER, Walter: Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardid/Mirabilit. In: SNETHLAGE, R. (Hrsg.): *Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung. Band 6*. Stuttgart : Ernst & Sohn, 1998, S. 123–136
- [Steiger u. a. 1998] STEIGER, Michael ; NEUMANN, Hans-Herrmann ; GRODTEN, Thorsten ; WITTENBURG, Christian ; DANNECKER, Walter: Salze in Natursteinmauerwerk - Probenahme, Messung und Interpretation. In: SNETHLAGE, R. (Hrsg.): *Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II,2*. Stuttgart, 1998, S. 61–91
- [Steiger u. Zeunert 1996] STEIGER, Michael ; ZEUNERT, Anke: Crystallization Properties of Salt Mixtures: Comparison of Experimental Results and Model Calculations. In: RIEDERER, Josef (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1996, S. 535–544, Volume I
- [Stoy 1966] STOY, Bernd: Diskussionsbeitrag zum Thema Elektrische Beheizung von Schulen und Kirchen. In: *Heizung - Lüftung - Haustechnik* 17 (1966), Heft 9, S. 327–336
- [Stürmer 1997] STÜRMER, Sylvia: *Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 1997
- [Supper 1967] SUPPER, Walter: Kirchenheizung und Orgel. In: *Deutsche Kunst- und Denkmalpflege* 25 (1967), Heft 1, S. 39–45
- [Sutter 1997] SUTTER, Hans-Peter: *Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Handbuch für Denkmalpfleger, Restauratoren, Konservatoren, Architekten und Holzfachleute*. Bern : Haupt, 1997

- [Tennikat u. a. 1995] TENNIKAT, Manuela ; SCHAD, J. ; JULING, Herbert ; GÜLKER, Gerd ; HINSCH, Klaus D. ; LEONHARDT, Christian: Untersuchungen zum Einfluss einer Warmluftheizung auf Wandmalereischäden in der Kirche St. Laurentii auf Föhr. In: SNETHLAGE, Rolf (Hrsg.): *Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung*. Berlin : Verlag Ernst & Sohn, 1995, S. 307–318
- [Troi 2000a] TROI, Alexandra: Pfarrkirche Maria Königin in Prad. Bericht zur Raumklimamessung vom 17.11. bis 10.12.1999. / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000b] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zu den hll. Johannes d.T. und Martin in St. Martin in Thurn. Bericht zur Raumklimamessung vom 3.2. bis 10.5.2000. / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000c] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Josef in Vilpian. Bericht zur Raumklimamessung vom 29.11. bis 20.12.1999 / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000d] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Vitus in Karneid. Bericht zur Raumklimamessung vom 11.12.1999 bis 20.12.1999. / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000e] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum Hlgst. Herzen Jesu in Branzoll. Bericht zur Raumklimamessung vom 21.12.1999 bis 13.2.2000. / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000f] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum Hlgst. Herzen Jesu in Branzoll. Bericht zur strömungsdynamischen Simulation. / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2000g] TROI, Alexandra: Unterlagen zum Workshop am 30.6.2000 in Bozen: Kirchenheizung - eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege / Europäische Akademie Bozen. 2000. – Forschungsbericht
- [Troi 2001a] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Leonhard in Pufels/Bula. Bericht zur Raumklimamessung vom 21.12.1999 bis 11.1.2000. / Europäische Akademie Bozen. 2001. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2001b] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Martin in Gsies. Bericht zur Raumklimamessung vom 3.2. bis 28.3.2000. / Europäische Akademie Bozen. 2001. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2001c] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zur hl. Magdalena in Gsies. Bericht zur Raumklimamessung vom 3.2. bis 28.3.2000. / Europäische Akademie Bozen. 2001. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2002a] TROI, Alexandra: Berechnung von Kennwerten für den Vergleich des Raumklimas in Kirchen mit unterschiedlichen Heizungssystemen / EURAC Research. 2002. – Forschungsbericht

- [Troi 2002b] TROI, Alexandra: Domkirche Maria Himmelfahrt in Brixen. Bericht zur Raumklimamessung vom 1.3. bis 27.3.2002. / Europäische Akademie Bozen. 2002. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2002c] TROI, Alexandra: Messbericht. Kirche zum hl. Antonius. Mobiler Strahlungsheizkörper, Typ Quarzheizröhren. / Europäische Akademie Bozen. 2002. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2002d] TROI, Alexandra: Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Sarnthein. Bericht zur Raumklimamessung vom 24.1. bis 20.2.2002. / Europäische Akademie Bozen. 2002. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2002e] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Apostel Andreas in Vals. Bericht zur Raumklimamessung vom 13.3. bis 9.4.2002. / Europäische Akademie Bozen. 2002. – Untersuchungsbericht
- [Troi 2002f] TROI, Alexandra: Pfarrkirche zum hl. Evangelisten Johannes in Gais. Bericht zur Raumklimamessung vom 25.10. bis 21.12.2001. / Europäische Akademie Bozen. 2002. – Untersuchungsbericht
- [Troi u. a. 2002] TROI, Alexandra ; FRANZEN, Christoph ; HAUSLADEN, Gerhard: Indoor Environment Measurements and Salt Degradation on Cultural Heritage. In: KOZŁOWSKI, Roman (Hrsg.): *5th EC Conference on Cultural Heritage Research*. Krakow, 2002
- [Troi u. a. 2006] TROI, Alexandra ; FRANZEN, Christoph ; HAUSLADEN, Gerhard: Computational Fluid Dynamics can ensure high quality conservation interventions. A case study. In: RADIĆ, Jure (Hrsg.) ; RAJČIĆ, Vlatka (Hrsg.) ; ŽARNIĆ, Roko (Hrsg.): *Heritage protection - construction aspects. Proceedings of the International Conference of the ECTP in Dubrovnik, October 14-17 2006*, 2006, S. 363–370
- [Troi u. Hausladen 2002] TROI, Alexandra ; HAUSLADEN, Gerhard: Heating Effects in South Tyrolean Churches. In: LEVIN, Hal (Hrsg.): *Indoor Air 2002: Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Santa Cruz, California, 2002, S. 848–853
- [Troi u. Hausladen 2006] TROI, Alexandra ; HAUSLADEN, Gerhard: Hot air heating in churches - the influence of operation mode. In: DRDAKY, Milos (Hrsg.): *SAVEUR*. Praha, 2006
- [Troi u. Hausladen 2008] TROI, Alexandra ; HAUSLADEN, Gerhard: Bericht zur Raumklimamessung im Münster Ingolstadt. Auswertungszeitraum 5.12.2007 bis 6.6.2008. / Ingenieurbüro Hausladen. 2008. – Untersuchungsbericht
- [UNI 10829 1999] UNI 10829 ; NORMAL, Commissione B. (Hrsg.): *Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione*.

- Misurazioni ed analisi.* UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1999
- [UNI 10969 2002] UNI 10969 ; NORMAL, Commissione B. (Hrsg.): *Beni culturali. Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni.* UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2002
- [Verein Deutscher Ingenieure 1991] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Erhalten historischer Bauten. Tagung Köln, 23. und 24. April 1991.* Düsseldorf : VDI-Verlag, 1991
- [Viazzo 2000] VIAZZO, Elena: *La climatizzazione degli edifici di culto*, Politecnico di Torino, II Facoltà di Ingegneria, Diplomarbeit, Juli 2000
- [Wegner 1972] WEGNER, M.: Untersuchungen zur Beheizung von Kirchen. 1972. – Forschungsbericht
- [Wright u. a. 2007] WRIGHT, Matthew D. ; FEWS, A. P. ; KEITCH, Paul A. ; HENSHAW, Denis L.: Small-ion and nano-aerosol production during candle burning: size distribution and concentration profile with time. In: *Aerosol Science and Technology* 41 (2007), Nr. 5, S. 475–484
- [Zehnder u. a. 1986] ZEHNDER, Konrad ; ARNOLD, Andreas ; SPIERIG, Hugo: Zerfall von Wandmalereien durch lösliche Salze. In: *Maltechnik* 92 (1986), Heft April, S. 9–32

A. Anhang

A.1 h-x-Diagramm

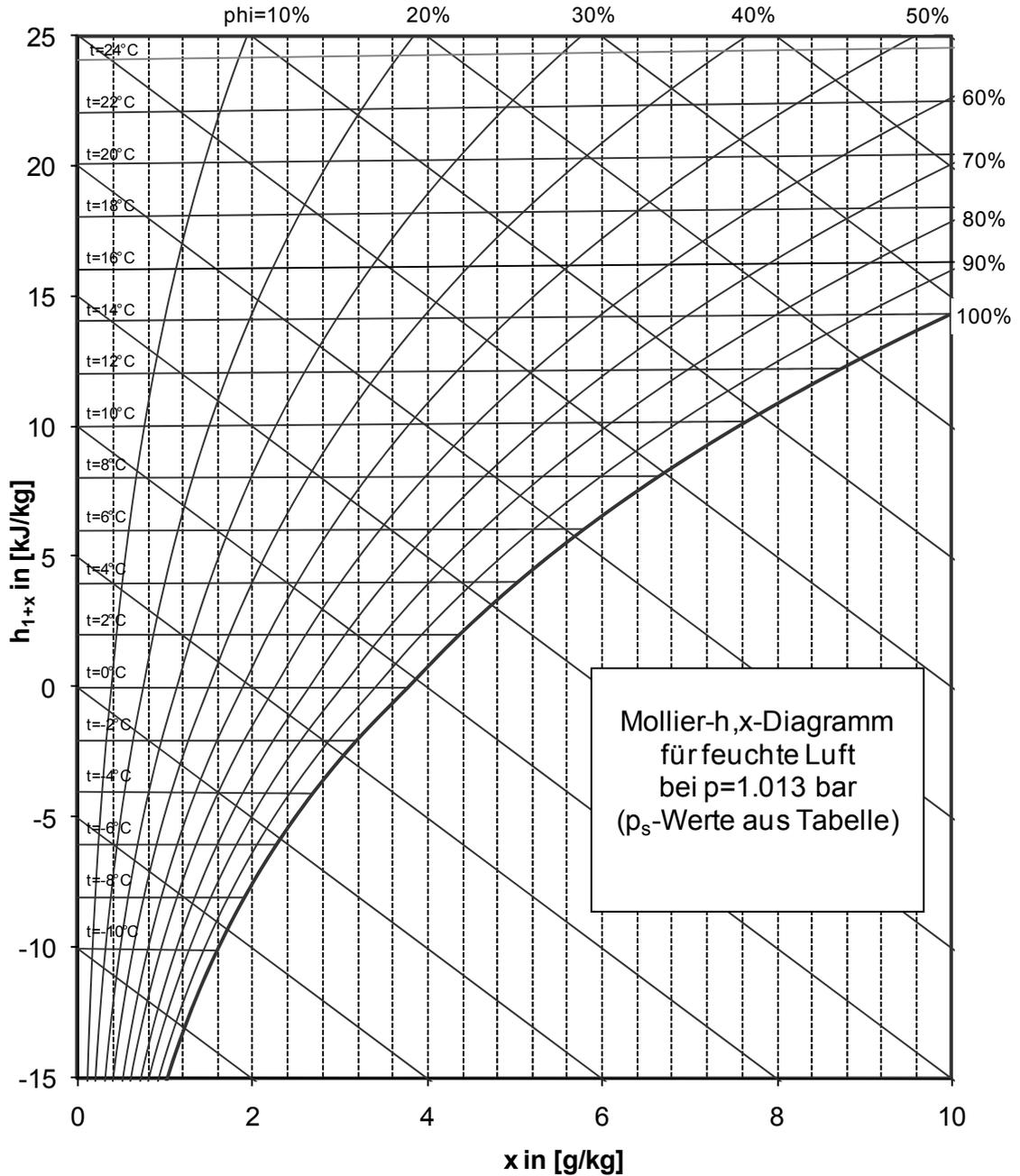


Abbildung A.1: h-x-Diagramm für feuchte Luft - kirchenheizungsrelevanter Ausschnitt

A.2 Wasseraktivitäts-Diagramme

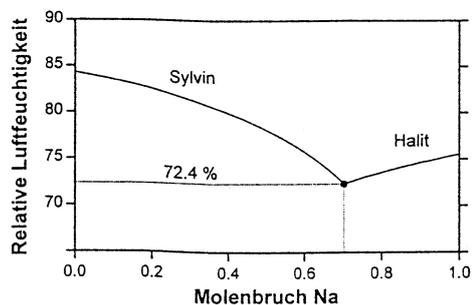


Abbildung A.2: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus KCl (Sylvin) und NaCl (Halit) aus [Steiger u. Dannecker, 1995]

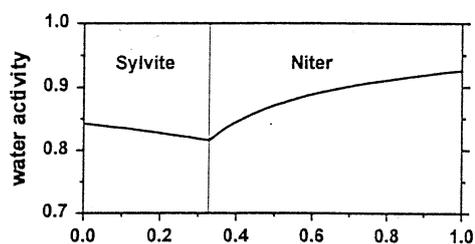


Abbildung A.3: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus KCl (Sylvin) und KNO₃ (Nitrokalit, Kalisalpeter) aus [Steiger, 1994]

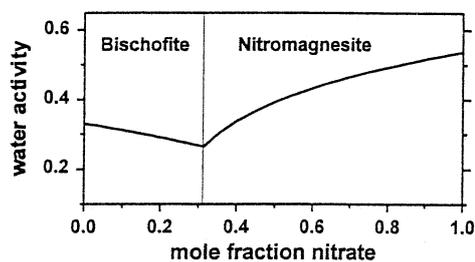


Abbildung A.4: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus MgCl (Bischofit) und Mg(NO₃)₂ (Nitromagnesit) aus [Steiger, 1994]

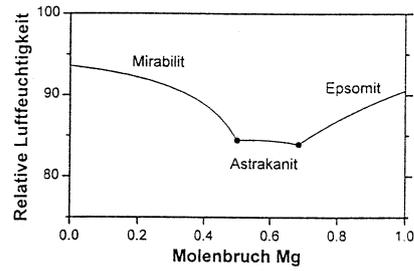


Abbildung A.5: Wasseraktivitätsdiagramm für das Natrium-Magnesium-Sulfat-System aus [Steiger u. Dannecker, 1995], $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mirabilit), $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Astrakanit), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Epsomit)

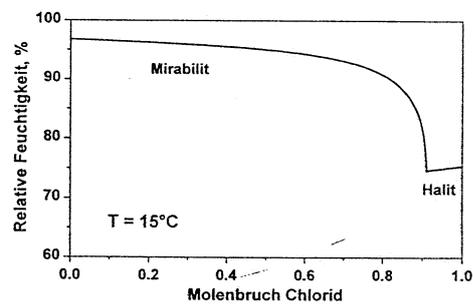


Abbildung A.6: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus Natriumsulfat und Natriumchlorid bei 15°C - mit Ausbildung des Natriumsulfat als $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mirabilit) aus [Steiger u. Dannecker, 1998]

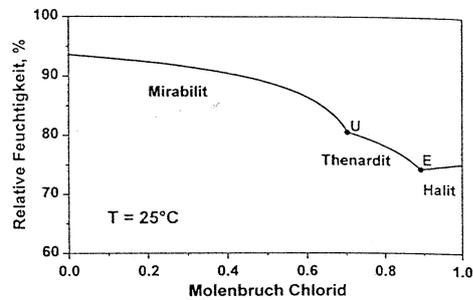


Abbildung A.7: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus Natriumsulfat und Natriumchlorid bei 25°C - mit Ausbildung des Natriumsulfat als $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mirabilit) und NaSO_4 (Thenardit) aus [Steiger u. Dannecker, 1998]

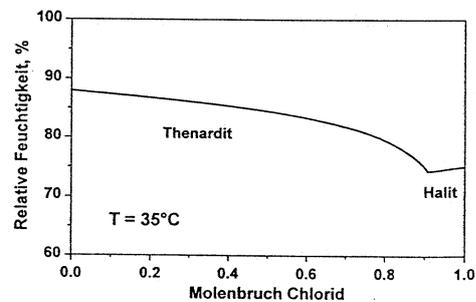


Abbildung A.8: Wasseraktivitätsdiagramm für das System aus Natriumsulfat und Natriumchlorid bei 35°C - mit Ausbildung des Natriumsulfat als NaSO_4 (Thenardit) aus [Steiger u. Dannecker, 1998]

A.3 Bestimmung des sicheren Bereiches für die relative Feuchtigkeit nach DIN EN 15757:2008-02

Das in der europäischen Norm EN 15757 (deutsche Fassung [DIN EN 15757 (Entwurf), 2008] vorgestellte Verfahren zur Bestimmung eines sicheren Bereiches für die relative Feuchtigkeit zeigt, wie anhand der Messung des Raumklimas - das sich für das darin erhaltene kulturelle Erbe als nicht schädlich erwiesen hat - über ein Jahr ein Zielniveau für die relative Feuchtigkeit sowie ein (2-stufiger) Zielbereich bestimmen lässt. Die Messung muss für mindestens ein Jahr erfolgen und Daten zumindest im Stundentakt speichern.

Um den Berechnungsvorgang anschaulicher darstellen zu können, werden die im Münster Ingolstadt gemessenen Daten exemplarisch eingesetzt (auch wenn diese nur für die Monate Dezember bis Mai vorliegen [Troi u. Hausladen, 2008]).

A.3.1 Zielniveau der relativen Feuchtigkeit

Das Zielniveau der relativen Feuchtigkeit (in der Norm als „Zielstufe“ bezeichnet, hergeleitet vom englischen „level“) soll der typischen, am häufigsten auftretenden relativen Feuchtigkeit des bisher herrschenden Raumklimas entsprechen. Es wird deshalb folgendermaßen bestimmt:

1. wird das 50. Perzentil der Messwerte über jedes einzelne Monat bestimmt (durch Ordnen der N Messwerte jedes Kalendermonats vom niedrigsten zum höchsten Wert und Ablesen des N/2-ten Wertes).
2. wird der Mittelwert der monatlichen 50. Perzentile als Zielniveau für die relative Feuchtigkeit festgelegt.
3. ergibt sich durch Verbinden der über der x-Achse aufgetragenen 50. Perzentile der jahreszeitliche Zyklus der monatlichen 50. Perzentile.

A.3.2 Zielbereich der relativen Feuchtigkeit

Die annehmbare Schwankungsbreite (Variabilität) sollte keine extremen Spitzen und Einbrüche umfassen. Da sich das kulturelle Erbe, das Gegenstand der Untersuchung ist, bereits an die häufigsten der bis dato auftretenden Schwankungen angepasst hat (und sei es durch Verformung und Rissbildung), können Schwankungen innerhalb des 84. Perzentils der gemessenen Tagesschwankungen als „sicher“ angesehen werden (für den Fall, dass das 84. Perzentil überschritten wird, sollte das tatsächlich vorliegende Risikoniveau für den gegebenen Fall durch Konservierungsspezialisten beurteilt werden). Dies entspricht Schwankungen der relativen Feuchtig-

keit, die das 50. Perzentil der Ableesungen um nicht mehr als eine Standardabweichung überschreiten. Der Zielbereich der relativen Feuchtigkeit wird folgendermaßen bestimmt:

1. werden die täglichen Schwankungen der relativen Feuchtigkeit als Differenz aus Tagesmaximum und Tagesminimum berechnet.
2. wird das 84. Perzentil der Tagesschwankungen für jeden Kalendermonat bestimmt. Das 84. Perzentil kennzeichnet die Grenze der annehmbaren täglichen Schwankungsbereiche für den gegebenen Monat.
3. markiert der niedrigste Monatswert des 84. Perzentils den „sicheren“ Bereich für Tagesschwankungen der relativen Feuchtigkeit. Alles was noch unter dem höchsten 84. Monatsperzentil liegt, hat als „Warnbereich“ zu gelten, und Tagesschwankungen, die größer sind als letzteres, gehören zum Risikobereich.
4. ergibt sich der jahreszeitliche Zyklus der typischen Tagesschwankungen der relativen Feuchtigkeit durch Verbinden der über der x-Achse aufgetragenen 84. Perzentile.

Münster Ingolstadt (Hochaltar), 5.12.2007 – 31.5.2008

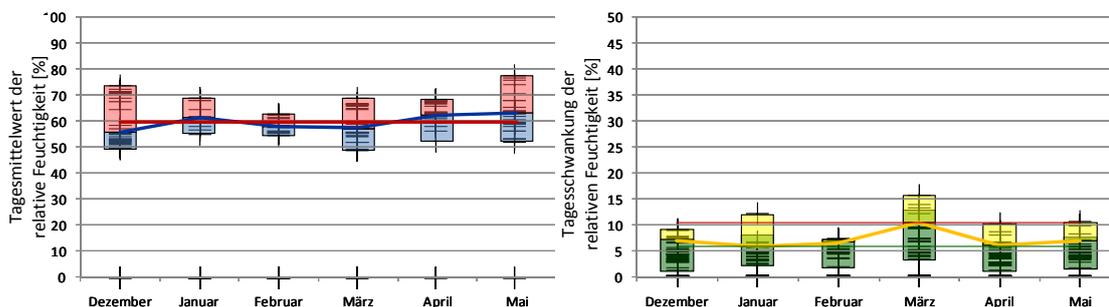


Abbildung A.9: Zielniveau und Zielbereich der relativen Feuchtigkeit am Beispiel der im Ingolstädter Münster (stationäre Temperierung auf 7-8°C mit Luftheizung) gemessenen Daten.

Pfarrkirche Martell, 14.12.1999 – 12.5.2000

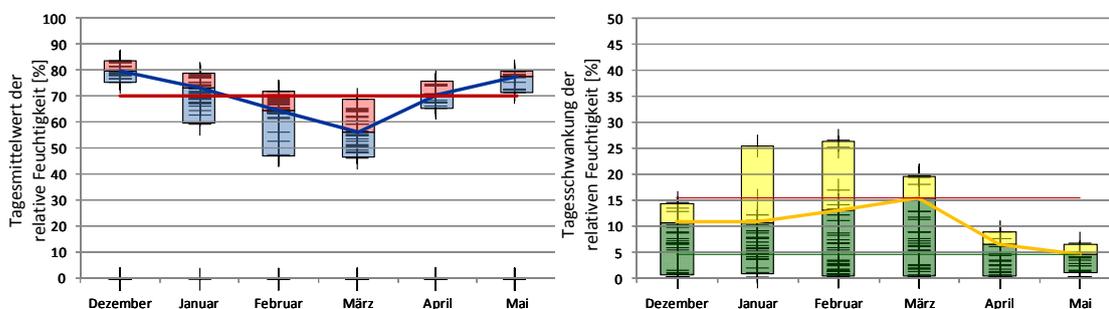


Abbildung A.10: Zielniveau und Zielbereich der relativen Feuchtigkeit am Beispiel der in der Pfarrkirche von Martell (Grundtemperierung auf 2-3°C und zusätzliche Heizung für Gottesdienste, Luftheizung) gemessenen Daten.

A.4 Zuluftparameter sowie Verteilung von Zu- und Abluftgittern nach Schellen

A.4.1 Anzahl der Zuluft- und Abluftgitter

Die Strömung im Raum ist nach Schellen [2002] im Wesentlichen durch die Anzahl und Verteilung der Zuluftgitter und nur in geringem Maße durch jene der Abluftgitter bestimmt. Er zitiert die Daumenregel nach Fitzner [1986], welche die Bestimmung der nötigen Zuluftgitter nach einem einfachen graphischen Verfahren erlaubt: Horizontale und vertikale Schnitte des Raumes werden hierzu in quadratische Abschnitte unterteilt (siehe Beispiel in A.10). Jeder dieser Abschnitte benötigt ein Zuluftgitter, wodurch die Mindestanzahl von Zuluftgittern festgelegt ist. Für die Abluft reicht ein Fünftel der Zuluftgitter.

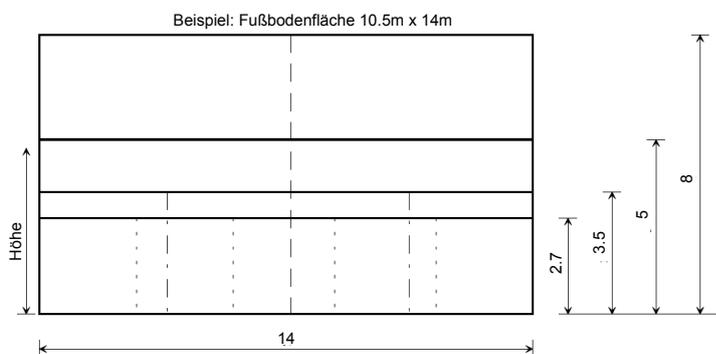


Abbildung A.10: Beispiel für die Ermittlung der Mindestanzahl von Zuluftgittern, graphisches Verfahren nach [Schellen, 2002] und Fitzner [1996].

Eine Raum mit Grundfläche 10,5x14m benötigt also

- bei 2,7m Höhe 5x4=20 Zuluftgitter (und 4 Abluftgitter)
- bei 3,5m Höhe 4x3=12 Zuluftgitter (und 2 Abluftgitter)
- bei 5m Höhe 2x3=6 Zuluftgitter (und 1-2 Abluftgitter)
- bei 8m Höhe 1x2=2 Zuluftgitter (und 1 Abluftgitter)

A.4.2 Zulufttemperatur

In Mainz [1973] und Knol 1971 wird die Zulufttemperatur auf 45°C, bzw. auf 25°C + Innenraumtemperatur limitiert - mit dem Ziel, wie Schellen [2002] interpretiert, Luftschichtung in der Kirche zu vermeiden. Hierzu eignet sich nach Schellen [2002] jedoch die Archimedeszahl, welche das Verhältnis von Auftriebsenergie zu kinetischer Energie einer Strömung beschreibt und in die sowohl Zulufttemperatur als auch -geschwindigkeit einfließen, wesentlich besser als eine Temperaturgrenzwert.

$$Ar = \frac{g \Delta T_0 D_h}{\theta_i u_0^2} \quad (A.1)$$

Ar = Archimedes-Zahl [-]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2] (9.81)

ΔT_0 = Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumlufte [K]

D_h = hydraulischer Durchmesser [m]

θ_i = Raumlufteemperatur [K]

u_0^2 = Zuluftgeschwindigkeit am Auslass [m/s]

Mit einer Archimedeszahl unter 0.05 ist es möglich, das Temperaturprofil auf unter 0.1 K/m zu halten.

A.4.3 Zuluftgeschwindigkeit

Die maximale Zuluftgeschwindigkeit ergibt sich nach Schellen [2002] aus dem Abstand des am nächsten stehenden Objektes: Die erreichte Wurflänge (length of throw) sollte 2/3 dieses Abstands nicht überschreiten.

Die minimale Zuluftgeschwindigkeit ergibt sich aus der maximalen Archimedeszahl von 0.05, und hängt auf diese Weise mit der Zulufttemperatur zusammen: Je wärmer diese ist, desto größer muss auch die Geschwindigkeit sein, auf dass die kinetische Energie der Strömung ihre Auftriebsenergie entsprechend stark übersteige. Ggf. muss geprüft werden, ob sich daraus nicht unzulässig hohe Geschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich ergeben (siehe Beispiel der St. Liudina Basilika in Schiedam [Schellen, 2002], hier auf S. 116 kurz zitiert).

A.5 Auflistung der verwendeten Meteorolog. Wetterdatensätze

Für die Berechnung des mittleren Taupunktes im Januar wurde auf die folgenden mit der Simulationssoftware TRNSYS mitgelieferten Wetterdatensätze zurück gegriffen [Solar Energy Laboratory, 2006b]:

Staat	Ort	Breitengrad [°N]	Längengrad [°O]	Höhe üdM [m]	WMO Code
AT	Graz	46.98	15.45	342	112400
AT	Innsbruck Univ	47.27	11.40	582	111200
AT	Salzburg	47.80	13.00	435	111500
AT	Wien - Hohe Warte	48.25	16.37	209	110350
BE	Brussels National	50.90	4.53	58	64510
BE	Oostende	51.23	2.92	12	64070
CH	Bern-Liebefeld	46.93	7.42	565	66310
CH	Davos	46.82	9.85	1590	67840
CH	Geneve-Cointrin	46.25	6.13	420	67000
CH	Zürich-SMA	47.38	8.57	556	66600
CZ	Prag	50.10	14.28	364	115180
DE	Berlin-Tempelhof	52.47	13.40	50	103840
DE	Bremen	53.05	8.80	24	102240
DE	Hamburg	53.65	10.12	49	101410
DE	Heiligendamm	54.15	11.85	21	109910
DE	Mannheim	49.52	8.55	106	107290
DE	München	48.13	11.70	529	108660
DE	Nürnberg	49.50	11.08	312	107630
DE	Stuttgart	48.83	9.20	318	107370
DE	Bonn	50.70	7.15	65	105050
DK	Kopenhagen	55.67	12.30	28	61800
ES	Madrid	40.45	-3.55	582	82210
FI	Helsinki-Airport	60.32	24.97	53	29740
FR	Lyon	45.73	5.08	240	74810
FR	Paris	48.73	2.40	96	71490
GB	Birmingham	52.45	-1.73	98	35340
GB	London	51.52	-0.12	77	37790
IE	Dublin	53.43	-6.23	82	39690
IT	Bologna	44.53	11.30	49	161400
IT	Bozen	46.47	11.33	241	160200
IT	Genua	44.42	8.93	55	169540
IT	Mailand	45.43	9.28	103	160800
IT	Venedig	45.50	12.33	6	161050
NL	Amsterdam	52.30	4.77	2	62400
NL	Groningen	53.13	6.58	4	62800
PL	Danzig	54.52	18.60	13	121450
PL	Krakau	50.08	19.80	237	125660
PL	Warschau	52.27	20.98	130	123750
RU	Moskau	55.83	37.62	156	276120
SE	Stockholm	59.65	17.95	61	24600

Tabelle A.1: Auflistung der verwendeten Meteorolog. Wetterdatensätze

Der Taupunkt wurde aus der im Wetterdatensatz verfügbaren Lufttemperatur und relativen Feuchtigkeit mit TRNSYS-Type 33 berechnet [Solar Energy Laboratory, 2006a].

B. Anhang Situationsanalyse

B.1 Fragebogen

Die Abbildungen B.1 bis B.7 zeigen eine ausgefüllte Checkliste für die Situationsanalyse am Beispiel der Pfarrkirche in Kaltern (mit Ausdruck von Komfortmessgerät und Hygrographen). Die sechste Seite des Fragebogens, die hier nicht abgebildet wird, ist für Kommentare vorgesehen.

Basisdaten								
Kirche	Name	PFARRKIRCHE HIMMELFAHRT				Adresse	Telefon	
Pfarrei	Name	PFARRKIRCHE HIMMELFAHRT				Adresse	Telefon	
Pfarrer	Name	DEKAN ARTUR WERT				Adresse	Telefon	
Ansprechpartner	Name					Adresse	Telefon	
Heizungsinstallateur	Name					Adresse	Telefon	
Architektur & Ausstattung								
Baujahr	1791-93		Sanierungen:		* 1050 m ³			
Grundriß	<input checked="" type="checkbox"/>	* 1960-68		300 Personen in Bänken				
Schnitte	<input type="checkbox"/>	1991 Außenanstrich						
		1994 Dachreparatur						
Bauphysik								
Wand	Fenster				Türen			
Material	Anzahl	groß <input type="checkbox"/>	mittel <input checked="" type="checkbox"/>	klein <input type="checkbox"/>	Anzahl 4			
Stärke	Verglasung	weiß <input checked="" type="checkbox"/>	bunt <input type="checkbox"/>	Windschutz <input type="checkbox"/> KEINER				
Bemerkungen	Einschränkung		Bemerkungen		Bemerkungen			
Deckenlöcher	milchig		gelber Rand. Δ 8x□, 4x□, 2x△, 2x□					
Ausstattung								
Bestuhlung	4 Blöcke mit Holzpodest, 2x5 Bänke, 2x8 Bänke							
Fresken	Decke, 2 T. Wände							
Altäre	Kloster - Altar							
Orgel	Pirchner, 1978 restauriert							
Nutzung								
Gottesdienste								
Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Andere: Gebetstage: Mo 9 ⁰⁰ GO, 17 ³⁰ GP, Di 9 ⁰⁰ GO, 17 ³⁰ GP, Aschermittwoch: Mi 9 ⁰⁰ WG, 19 ³⁰ GO	
		7 ¹⁵ GO				9 ⁰⁰ GO		
						10 ⁰⁰ GO		
						11 ⁰⁰ GO	Legende GO Gottesdienst GP Gebetspredigt WG Wortgottesdienst	
				19 ³⁰ GO	19 ³⁰ GO			
Konzerte								
JA <input checked="" type="checkbox"/>	NEIN <input type="checkbox"/>	Wöch. <input type="checkbox"/>	Mon. <input type="checkbox"/>	Spor. <input type="checkbox"/>	Sommer <input checked="" type="checkbox"/>	Winter <input type="checkbox"/>	Anzahl/Jahr:	
Bemerkungen 5-6 mind., Mai - Herbst, 2.T. auch 14-tägig								
Besichtigung								
Öffnungszeiten	von	bis	von	bis	von	bis		
Besucherzahl								
Andere								

Abbildung B.1: Fragebogen - 1. Seite

Heizungssystem				
Baujahr 1964	Leistung	Verbrauch/Jahr	Pläne <input checked="" type="checkbox"/>	Techn.Unterlagen <input checked="" type="checkbox"/>
Typ HOVAL STP 325			Kosten	
Einzelofen <input type="checkbox"/>	Brennstoff	Anschaffung		
Radiatorheizung <input type="checkbox"/>	Brennstoff	Brennstoff/Jahr		
Strahler <input type="checkbox"/>	Brennstoff	Elektrisch		
Bankheizung <input type="checkbox"/>	Brennstoff	Wartung		
Bodenheizung <input type="checkbox"/>	Brennstoff			
Wärmeluftheizung <input checked="" type="checkbox"/>	Brennstoff <input type="checkbox"/>			
Bemerkungen 1990 neuer Öltank 325.000 kcal/h 57.1429 "			Bemerkungen potenze nominale potenza fessole	
Regelung				
stationär <input type="checkbox"/>	instationär mit Grundtemperierung <input type="checkbox"/>	instationär ohne Grundtemperierung <input checked="" type="checkbox"/>		
Grundtemperatur		Maximaltemperatur	Heiztemperatur	
Steuerung <input checked="" type="checkbox"/>	Regelung <input type="checkbox"/>	Temperatur <input type="checkbox"/>	Feuchtigkeit <input type="checkbox"/>	Außentemp. <input type="checkbox"/>
Aufheizprofil Wochenprogramm, ~12°C, wird aber nicht erreicht				
Bemerkungen Uhr in Sakristei. Getrennte Wärmehäuser Kirche / Diodum, aber gemeinsamer Kessel				
Subjektive Beurteilung				
	Name	Name	Name	Name
Temperatur				
Luftzug				
Bemerkungen				
Schäden				
Schwärzung <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Schwindverformung <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Krustenbildung <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Schalenbildung <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Ausblühungen <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Abmahlungen, Risse, Abplatzungen <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Algenbildung <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Pilzbefall <input type="checkbox"/>	Bemerkungen			
Bemerkungen				

Datenblatt Messung

Messpunkt Nr außen Uhrzeit: 17:30	
Beschreibung	
Temperatur	4°C
Rel. Feuchtigkeit	38%
Luftgeschwindigkeit	
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 4 Uhrzeit: ca. 18:15	
Beschreibung BANK VORN RECHTS	
Temperatur	10,9°C
Rel. Feuchtigkeit	55%
Luftgeschwindigkeit	0,1 m/s
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 1 Uhrzeit: 17:31	
Beschreibung	
Temperatur	10,2°C
Rel. Feuchtigkeit	60%
Luftgeschwindigkeit	
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 5 Uhrzeit: ca. 18:15	
Beschreibung HINTERER BANKBLOCK, VORN LINKS	
Temperatur	10,9°C
Rel. Feuchtigkeit	55%
Luftgeschwindigkeit	0,06 m/s
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 1 Uhrzeit: 17:40	
Beschreibung	
Temperatur	12°C
Rel. Feuchtigkeit	52%
Luftgeschwindigkeit	
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 6 Uhrzeit: ca. 18:11	
Beschreibung HINTERER BANKBLOCK, VORN RECHTS	
Temperatur	10,8°C
Rel. Feuchtigkeit	54%
Luftgeschwindigkeit	0,07 m/s
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

Messpunkt Nr 3 Uhrzeit: 18:15 noch EO	
Beschreibung BANK VORN LINKS	
Temperatur	10,9°C
Rel. Feuchtigkeit	54%
Luftgeschwindigkeit	0,16 m/s
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

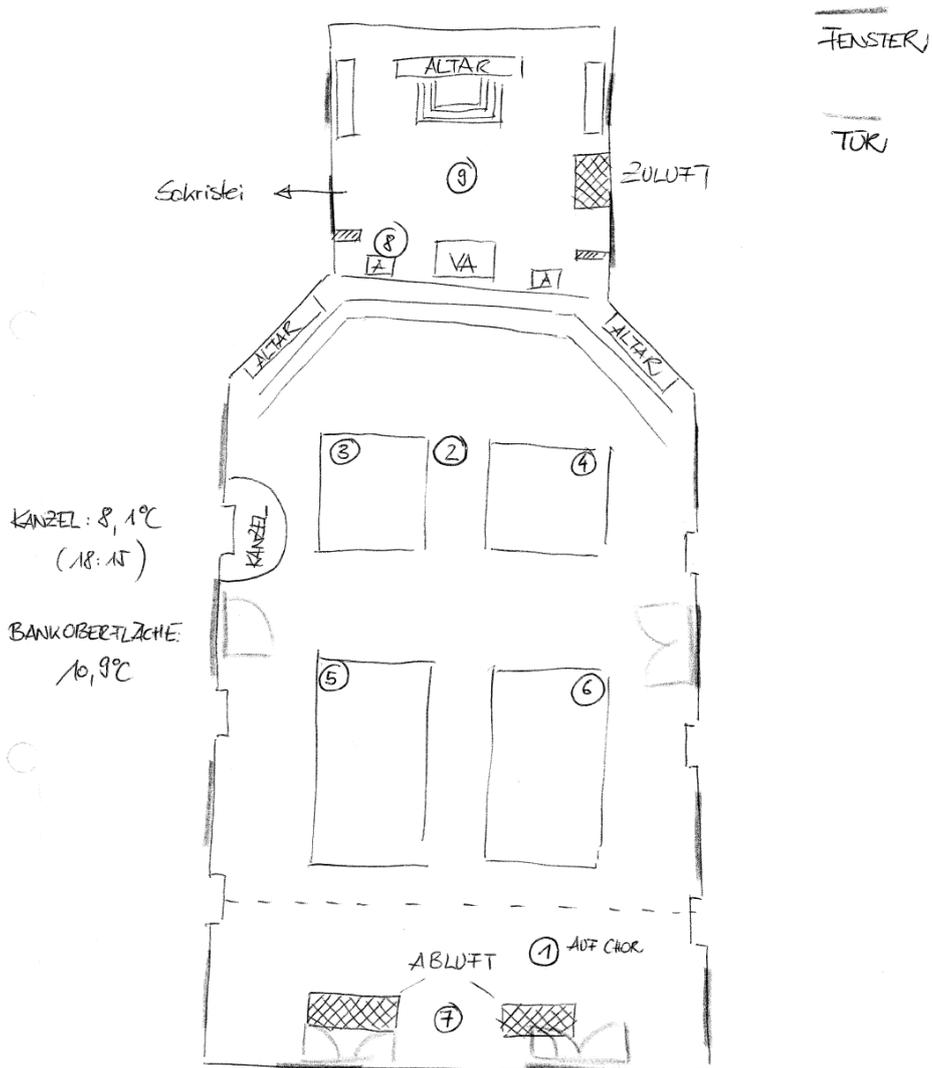
Messpunkt Nr 7 Uhrzeit: ca. 18:15	
Beschreibung HINTEN, ZWISCHEN DEN TÜREN	
Temperatur	10,8°C
Rel. Feuchtigkeit	52%
Luftgeschwindigkeit	0,1 m/s
Qualitative Beschreibung des Luftzugs	

⑧ ATIBO ca. 18:15
 11,1°C
 0,1 m/s

⑨ ALTARRAUM ca. 18:15
 11°C
 55%
 0,07 m/s

Messung mit Raumklima-Koffer	
Messpunkt Nr 1	Uhrzeit:
Beschreibung CHOR	
Anzahl	
Messpunkt Nr 2	Uhrzeit:
Beschreibung KIRCHENSCHIFF, VORN	
Anzahl	
Messpunkt Nr	Uhrzeit:
Beschreibung	
Anzahl	
Messpunkt Nr	Uhrzeit:
Beschreibung	
Anzahl	
Messpunkt Nr	Uhrzeit:
Beschreibung	
Anzahl	

Ergänzende Skizzen



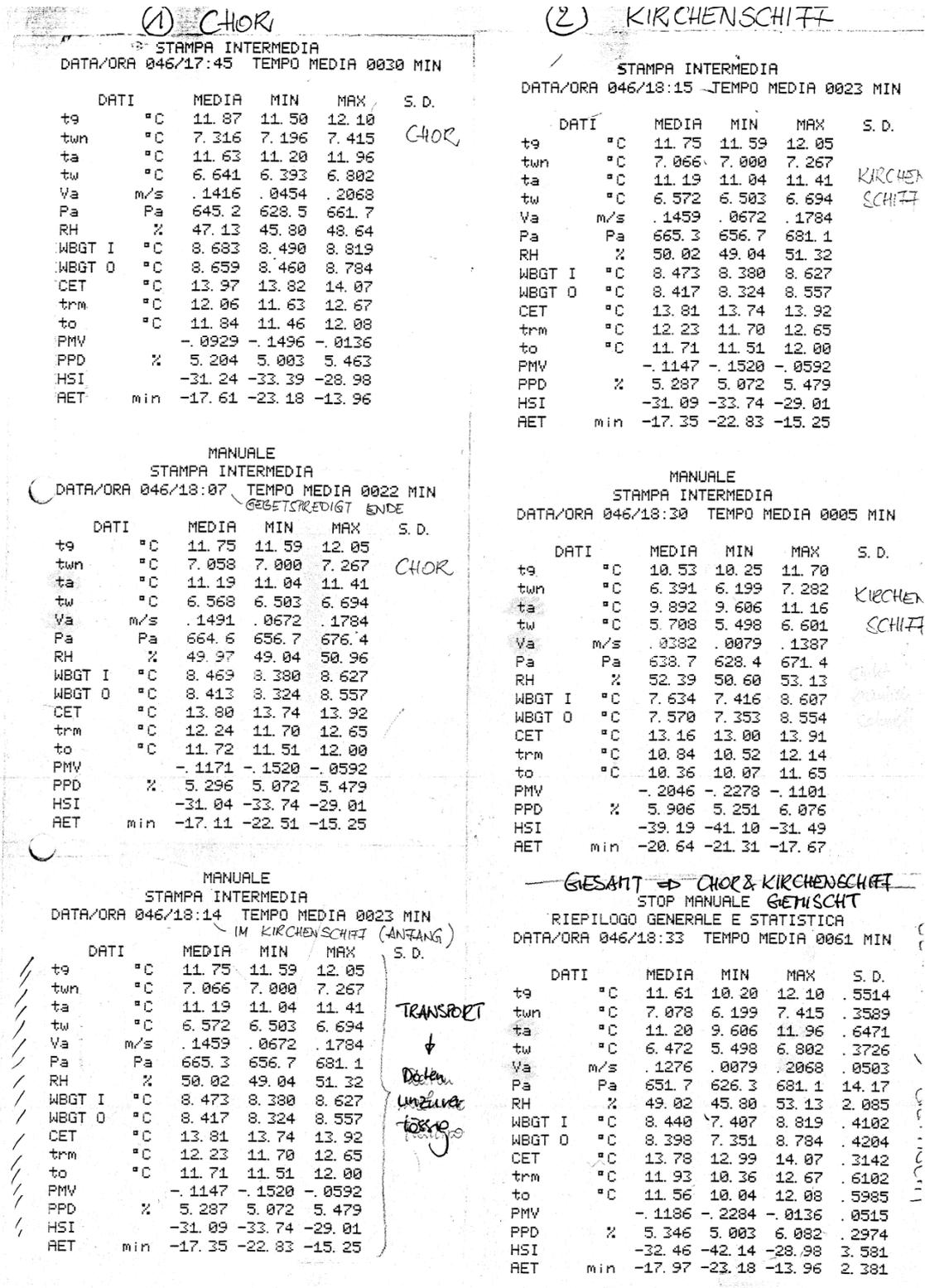


Abbildung B.6: Fragebogen - Aufzeichnungen Komfort-Messgerät

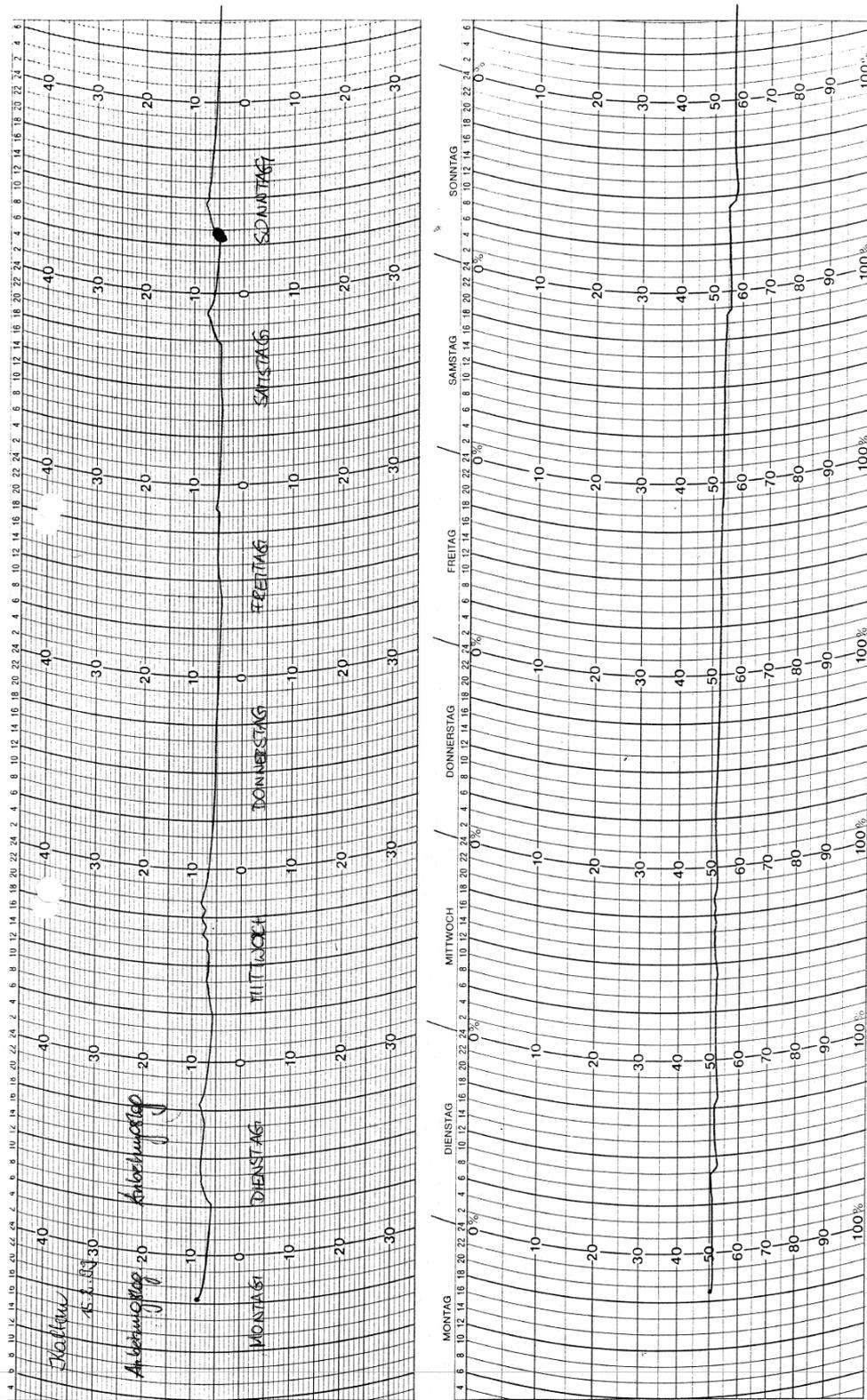


Abbildung B.7: Fragenbogen - Aufnahmen von Feuchte und Temperatur über eine Woche mit dem Hygrographen (wurde nur in ausgewählten Fällen durchgeführt)

B.2 Kurzportraits der untersuchten Kirchen

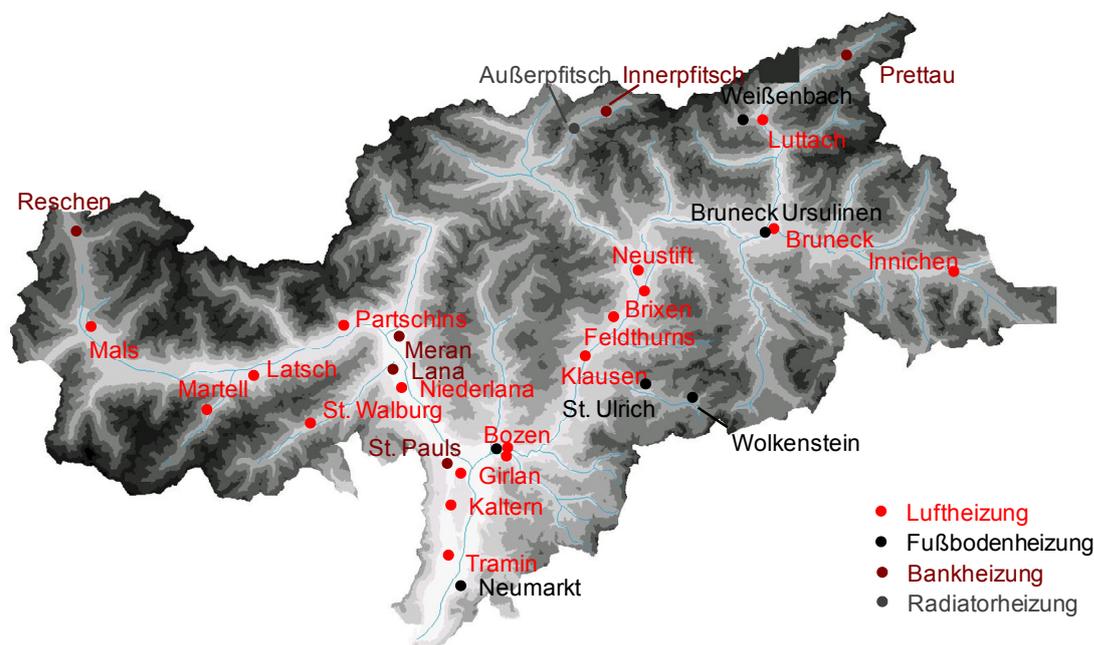


Abbildung B.8: Übersichtskarte der im Rahmen der Situationsanalyse in Südtirol besuchten Kirchen.

Name Ort	Dom Bozen	Franziskaner Bozen	Dom Brixen	Pfarrkirche Bruneck	Pfarrkirche Feldthurns	Pfarrkirche Girlan	Pfarrkirche Innichen
Datum	12.02.1999	11.01.1999	22.03.1999	12.03.1999	01.03.1999	16.02.1999	12.03.1999
auch Monitoring		ja	ja				
Lage und Außenklima							
Höhe [m]	262	262	560	820	850	434	1175
Heiztage [d]	168.9	168.9	194.9	226.4	210.7	161.2	266.9
HGT 12/20 [Kd]	2568	2568	3120	3845	3376	2272	4766
HGT 10/10 [Kd]	897	897	1189	1604	1438	682	2116
Architektur und Nutzung							
Nutzung	täglich	täglich	täglich	täglich	täglich	täglich	WE+3/4
Klass. Größe	groß	groß	groß	groß	mittel	mittel	groß
Volumen [m ³]	20000‡	12000	15000‡	12000‡	3800†	5000‡	9000‡
Heizungssystem							
Typ	LH	LH	LH	LH	LH	LH	LH
Heizweise	S	G	I	I	G	G	G
Baujahr	1862/1989	1988/1990	1964/1981	1968/1968	1973/1997	1990/1990	1968/1981
Brennstoff	Gas	Gas	Öl	Öl	Öl	Öl	Öl
Leistung	618	215	712	411	349	130	380
spez. Leistung [kW/m ³]	30.9	17.9	47.5	34.3	91.8	26.0	42.2
Zuluft-T [°C]	42	35		28	35	25	
Zuluft-v [m/s]	0.5	1.5		3	2.5	2.8	
Regelung	T	Z+T	Z+H	H	Z+T	Z+T	Z+T
Aufheizzeit		4h, 1K/h	2h	0.5, 2K/30		4h, 1K/h	1.5h
Grund-T [°C]	14	8			6	8	6
Raum-T [°C]	14	12		7	10	12	
Klass. Temperatur	12-15°C	12-15°C	10-12°C	5-8°C	8-10°C	10-12°C	8-10°C

Tabelle B.1: Charakteristika und Messergebnisse der in der Situationsanalyse untersuchten Kirchen - Teil 1

Name Ort	Pfarrkirche Kaltern	Pfarrkirche Klausen	Pfarrkirche Latsch	Pfarrkirche Luttach	Pfarrkirche Mals	Pfarrkirche Martell
Datum	15.02.1999	26.02.1999	05.03.1999	16.03.1999	11.03.1999	11.03.1999
auch Monitoring						ja
Lage und Außenklima						
Höhe [m]	460	525	639	970	998	1300
Heiztage [d]	161.2	196.2*	196.3	238*	234*	262*
HGT 12/20 [Kd]	2272	3062*	3077	4100*	3900*	4500*
HGT 10/10 [Kd]	682	1120*	1137	1551*	1605*	1948*
Architektur und Nutzung						
Nutzung	WE+1/2	WE+3/4	täglich	WE+3/4	täglich	WE+3/4
Klass. Größe	mittel	mittel	mittel	klein	mittel	klein
Volumen [m ³]	7700†	3199	5000‡	1100	5000	1400
Heizungssystem						
Typ	LH	LH	LH	LH	LH	LH
Heizweise	I	G	I	I	I	G
Baujahr	1964/1964	1970/1996	1970/1997	1975/1975	1972/1972	1970/1971
Brennstoff	Öl	Öl	Öl	Öl	Öl	Öl
Leistung	378	190	116.3	110	348.8	93
spez. Leistung [kW/m ³]	49.1	59.4	23.3	100.0	69.8	66.4
Zuluft-T [°C]		53	35		35	45
Zuluft-v [m/s]		1.8	1.5		1.6	2
Regelung	Z	Z+T	H+T	H	H+T	Z+T
Aufheizzeit		0.5h	1h	nachts	0.75h	
Grund-T [°C]		5		5.5		5
Raum-T [°C]		12	10	7	10	10
Klass. Temperatur	8-10°C	10-12°C	10-12°C	5-8°C	10-12°C	8-10°C

Tabelle B.2: Charakteristika und Messergebnisse der in der Situationsanalyse untersuchten Kirchen - Teil 2

Name Ort	Klosterkirche Neustift	Pfarrkirche Niederlana	Pfarrkirche Partschins	Pfarrkirche Tramin	St. Walburg Ulten	Eucharistiner Bozen
Datum	19.02.1999	05.03.1999	15.03.1999	22.02.1999	08.03.1999	10.02.1999
auch Monitoring						
Lage und Außenklima						
Höhe [m]	600	289	640	276	1190	262
Heiztage [d]	194.9	183.1	199.2	170.6	243.5	168.9
HGT 12/20 [Kd]	3120	2765	3138	2585	4018	2568
HGT 10/10 [Kd]	1189	954	1168	887	1603	897
Architektur und Nutzung						
Nutzung	täglich	täglich	täglich	täglich	WE+1/2	täglich
Klass. Größe	groß	mittel	mittel	mittel	klein	groß
Volumen [m ³]	12000‡	5000‡	5000‡	6000‡	2200†	12000
Heizungssystem						
Typ	LH	LH	LH	LH	LH	LH+FH
Heizweise	S	S	G	S	I	S
Baujahr	1980/1997	1967/1967	1969/1969	1986/1986	1970/1970	1988/1988
Brennstoff	Hackschnitzel	Öl	Öl	Öl	Öl	Gas
Leistung	431	255.8	210	0	168.6	246
spez. Leistung [kW/m ³]	35.9	51.2	42.0	0.0	76.6	20.5
Zuluft-T [°C]		35		33	48	25
Zuluft-v [m/s]		1.7		1.2	1.4	0.65
Regelung	Z	T	H	T	H	Z+T
Aufheizzeit			0.5h			
Grund-T [°C]			10			12
Raum-T [°C]	12	10	13	12.5		12
Klass. Temperatur	10-12°C	10-12°C	10-12°C	12-15°C	10-12°C	12-15°C

Tabelle B.3: Charakteristika und Messergebnisse der in der Situationsanalyse untersuchten Kirchen - Teil 3

Name Ort	Hl. Kreuz Kirche Lana	Pfarrkirche Innerpfitsch	Pfarrkirche Prettau	Pfarrkirche Reschen	Pfarrkirche St. Pauls	St. Nikolaus Meran
Datum	05.03.1999	06.03.1999	16.03.1999	07.03.1999	18.02.1999	07.03.1999
auch Monitoring	ja			ja		
Lage und Außenklima						
Höhe [m]	289	1452	1473	1479	395	333
Heiztage [d]	183.1	284.7	285	290.3	161.2	183.1
HGT 12/20 [Kd]	2765	5014	4901	5093	2272	2765
HGT 10/10 [Kd]	954	2189	2075	2213	682	954
Architektur und Nutzung						
Nutzung	WE+1/2	WE+1/2	WE+3/4	WE	täglich	täglich
Klass. Größe	groß	klein	klein	groß	mittel	groß
Volumen [m ³]	14000†	1000‡	1000‡	9000‡	5400†	12000‡
Heizungssystem						
Typ	LH + BH	BH	BH	BH	BH	BH + FH
Heizweise	I	I	I	I	I	I
Baujahr	1950/1987	1991	1992	1995	1995	1996
Brennstoff	Öl+Strom	Strom	Strom	Strom	Strom	Strom
Leistung	0	12	25	28.3	33	80
spez. Leistung [kW/m ³]	0.0	12.0	25.0	3.1	6.1	6.7
Zuluft-T [°C]						
Zuluft-v [m/s]						
Regelung	Z	H	Z	H	Z	Z+T
Aufheizzeit	2h	4h	2h	12h		2h
Grund-T [°C]						
Raum-T [°C]						8
Klass. Temperatur	10-12°C	5-8°C	5-8°C	5-8°C	8-10°C	8-10°C

Tabelle B.4: Charakteristika und Messergebnisse der in der Situationsanalyse untersuchten Kirchen - Teil 4

Name Ort	Ursulinen Bruneck	Pfarrkirche St. Ulrich	Pfarrkirche Wolkenstein	Pfarrkirche Neumarkt	Pfarrkirche Weißenbach	Pfarrkirche Außerpfitsch
Datum	12.03.1999	02.03.1999	02.03.1999	17.02.1999	16.03.1999	06.03.1999
auch Monitoring	ja					
Lage und Außenklima						
Höhe [m]	820	1240	1563	218	1325	1441
Heiztage [d]	226.4	244.4	284.6	170.6	262*	284.7
HGT 12/20 [Kd]	3845	4147	5062	2585	4500*	5014
HGT 10/10 [Kd]	1604	1724	2237	887	1976*	2189
Architektur und Nutzung						
Nutzung	täglich	täglich	täglich	täglich	WE+1/2	WE+1/2
Klass. Größe	klein	groß	groß	mittel	klein	klein
Volumen [m ³]	1900†	12000‡	9000‡	4300†	1500†	1000‡
Heizungssystem						
Typ	FH	FH	FH	FH	FH	RH
Heizweise	S	G	S	G	S	I
Baujahr	1995	1996	1988	1987	1998	1985
Brennstoff	Öl	Gas	Öl	Gas	Öl	Strom
Leistung		130		53	36	6
spez. Leistung [kW/m ³]		10.8		12.3	24.0	6.0
Zuluft-T [°C]						
Zuluft-v [m/s]						
Regelung	T	Z+T	Z+T	Z+T	T	H
Aufheizzeit						1h
Grund-T [°C]						
Raum-T [°C]			12	16		
Klass. Temperatur	12-15°C	10-12°C	10-12°C	über 15°C	8-10°C	unter 5°C

Tabelle B.5: Charakteristika und Messergebnisse der in der Situationsanalyse untersuchten Kirchen - Teil 5

C. Anhang Monitoring

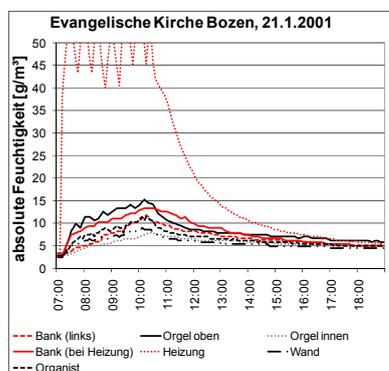


Abbildung C.1: Temperaturverlauf beim Heizen, beispielhaft dargestellt am 21.1.2001. Gottesdienst um 9:30 Uhr

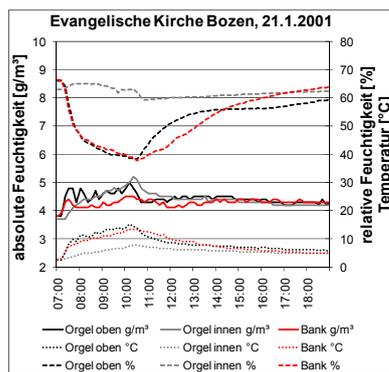


Abbildung C.2: Feuchteverhalten im Bereich der Orgel, beispielhaft dargestellt am 21.1.2001. Die konstant bleibende relative Feuchtigkeit im Inneren der Orgel bei zunehmender absoluter Feuchtigkeit deutet auf Desorptionsvorgänge hin

C.1 Kurzportraits der untersuchten Kirchen

C.1.1 Evangelische Kirche Bozen

Die evangelische Kirche in Bozen wird mit Konvektorenheizung temperiert. Die Heizelemente entlang der Außenwände werden jeweils 2 Stunden vor Gottesdienstbeginn aktiviert.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 6.12.2000 bis 20.3.2001 (mit Unterbrechungen) mit bis zu 10 Datenloggern, davon 4 mit Feuchtigkeitssensor (Orgel oben und innen, Bank, außen).

Die Kirche reagiert auf Änderungen des Außenklimas sehr rasch (Abbildung C.3). Insbesondere die durch große Fenster einfallende Sonne wärmt die Luft im Kircheninneren auf - um teilweise mehr als 2°C, wodurch die rel. Feuchte an der Orgel um 5-10% sinkt

Beim Heizen selbst steigt die Temperatur oben im Raum um 10-12 K, in den Bänken um 8-10 K. An der Orgel entsteht (i) eine Temperaturdifferenz über der Höhe von bis zu 5 K, (ii) ein noch größeres Temperaturgefälle zwischen innen und außen (Abb. C.1). Damit verbunden sind ein beträchtlicher Feuchteinbruch (20-25%) und Desorptionsvorgänge (Abb. C.2).

Konstante 10°C, wie zur Schonung der Orgel angedacht, könnte Feuchteinbruch und Temperaturgradienten an Sonntagen vermeiden, nicht aber die sonnenverursachten Schwankungen. Außerdem würde die rel. Feuchte insgesamt stark absinken. Mildern könnten die Spitzen evtl. hygroskopische Materialien und eine Maximaltemperatur an kalten Tagen.

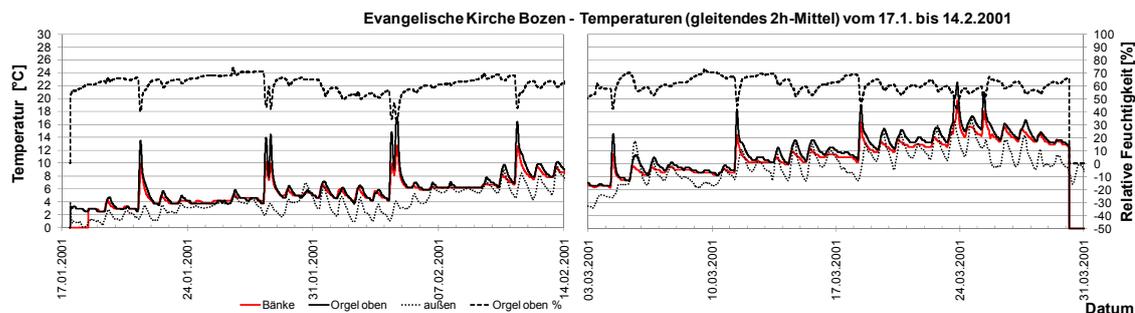


Abbildung C.3: Verlauf von Temperatur und rel. Feuchte über der Messperiode: Die Temperatur in der Kirche steigt mit der Außentemperatur an

C.1.2 Franziskanerkirche Bozen

In der Kirche zum hl. Franziskus in Bozen wurde in den 1990er Jahren eine neue Luftheizung eingebaut.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 8.2. bis 7.3.2000 (sowie mit reduzierter Sensoranzahl vom 17.4. bis 15.5.2000) mit 19 Datenloggern (7 im Aufenthaltsbereich, 2 an Oberflächen, 5 für 2 Höhenprofile, je 1 bei Hochaltar, Orgel, Seitenkapelle und außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Volksaltar, Zuluft, außen).

Die Kirche wird auf 10°C grundtemperiert, für die Gottesdienste wird die Temperatur auf 14°C erhöht - 4 Stunden vor dem ersten Gottesdienst beginnend und um jeweils 1 K pro Stunde, wie aus Denkmalpflegegründen empfohlen.

Da aber die Temperatur in größerer Höhe wesentlich schneller steigt als in den Bänken, herrschen oben schon über 16°C, wenn der Sensor im Aufenthaltsbereich das Erreichen von 1K Aufheizen meldet - und die Heizung für die nächste Stunde abschaltet, denn die Heiztemperatur kann nicht moduliert werden. Diese Kombination aus ungenügender Anzahl Sensoren und nur im Ein/Aus-Modus regelbarer Heizung führt zum in Abbildung C.4 gut erkennbaren „Sägezahn“-Muster - das dem Ansatz der 1 K/h Aufheizung nicht gerecht wird.

Die relative Feuchte schwankt zwischen 40 und 45%, zeitweise sogar nur 35%. Während die relative Feuchte im Kirchenschiff während des Heizens um bis zu 10% absackt, schwankt sie am Volksaltar nur wenig. Beim wertvollen Klocker-Altar ist sie tendenziell höher als am Volksaltar, schwankt beim Heizen nicht übermäßig stark - und reagiert deutlich auf die Sonneneinstrahlung.

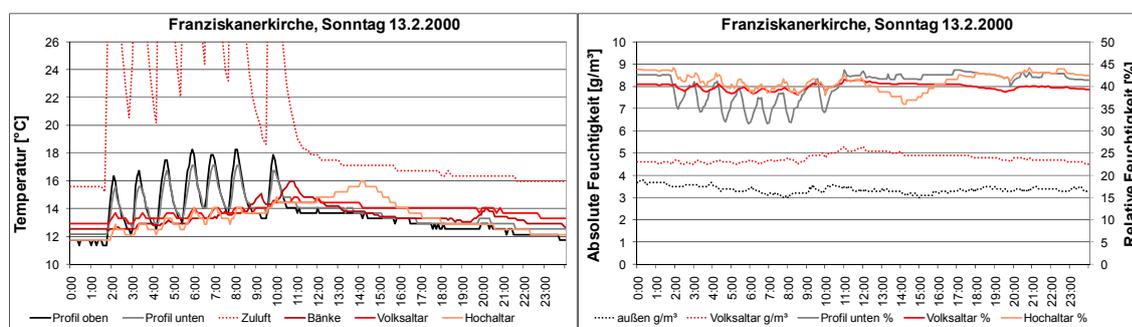


Abbildung C.4: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf am Sonntag 13.2.2000. Gottesdienste um 7:00, 8:30, 10:00 und 19:30 Uhr - die Besucher sorgen für zusätzliche 1-2 K Temperaturzunahme im Bankbereich

C.1.3 Pfarrkirche Branzoll (1)

Die Pfarrkirche zum Hlgst. Herzen Jesu liegt im Dorfzentrum von Branzoll und ist mindestens einmal täglich für Gottesdienste und gemeinsame Gebetsstunden in Verwendung. Zu Beginn der Untersuchung ist die Kirche mit einer Luftheizung ausgestattet, welche in der Regel eine halbe Stunde vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet und am Ende des Gottesdienstes wieder ausgeschaltet wird. Der Lufteinlass und -abzug befinden sich vorn im rechten Seitenschiff: der Einlass an der Frontwand in einer Höhe von 6 m, der Abzug am Boden (Abbildung 5.49).

Die erste Raumklimamessung [Troi, 2000e] erfolgte vom 21.12.1999 bis 13.2.2000 mit 24 Datenloggern (7 im Aufenthaltsbereich, 5 an Oberflächen, 11 für 3 Höhenprofile, Zuluft und außen), davon 4 mit Feuchtigkeitssensor (Volksaltar, Orgel, Zuluft, außen).

In Abschnitt 5.4.1 sind die Ergebnisse der Messung detailliert dargestellt und kommentiert, hier seien deshalb nur die wichtigsten Aspekte wiederholt.

Anhand des Temperaturverlaufs am 26.12.1999 (Abbildung C.5) können alle drei Problembereiche anschaulich erläutert werden:

Erstens bildet sich während des Heizens ein großes vertikales Temperaturprofil heraus: Während unter der Decke schon beinahe 20°C herrschen, sind es in den Bänken noch die anfänglichen 5°C, die erst mit Eintreffen der Kirchgänger steigen. Aber auch am Ende des Gottesdienstes ist es oben noch 10 K wärmer als unten. Die Heizenergie verpufft unter der Decke.

Zweitens sinkt die relative Feuchtigkeit unter der (Holzkassetten-)Decke und bei der Orgel durch die dortigen Temperaturspitzen bei jedem Heizereignis um 20-25%, zum Teil bis unter 30%.

Drittens ist gleichzeitig die absolute Feuchtigkeit dennoch so hoch, dass an kalten Wandbereichen - vor allem im Sockelbereich, aber nicht nur - die Taupunkttemperatur über der Oberflächentemperatur liegt und Kondensation auftritt.

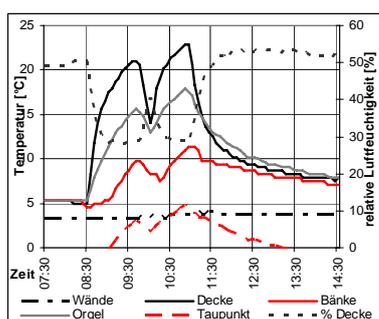


Abbildung C.5: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen (hier: 26.12.1999) für unterschiedliche Messstellen

C.1.4 Pfarrkirche Branzoll (2)

Die Pfarrkirche von Branzoll diente als Fallstudie zur Anwendbarkeit von CFD-Simulation in Kirchen als Entscheidungshilfe bei Heizungseinbau oder -erneuerung (siehe Abschnitt 5.4). Als Ergebnis der Simulation wurde eine Fußbodenheizung mit verstärkter Heizleistung in Wandnähe empfohlen [Troi, 2000f; Troi u. a., 2006].

Im Sommer 2001 wurde im Zuge einer allgemeinen Restaurierung eine Fußbodenheizung eingebaut. Vom 8.2. bis 8.3. wurde das Raumklima erneut aufgenommen, um die Veränderung zu prüfen. Die Sensorverteilung entsprach derjenigen der ersten Messung.

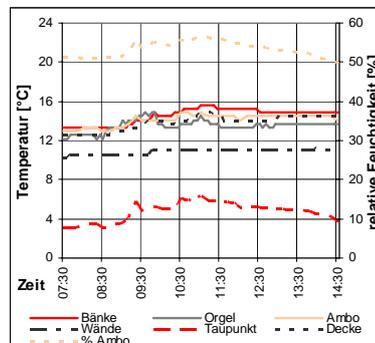


Abbildung C.6: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen (hier: 10.2.2002) für unterschiedliche Messstellen

Der Temperaturverlauf für einen typischen Sonntagmorgen, in Abbildung C.6 dargestellt, zeigt, dass die Temperaturverteilung wesentlich ausgeglichener ist: Am wärmsten ist es im Bankbereich, mit der Höhe nimmt die Temperatur leicht ab, aber die Differenz zwischen Bankbereich und Orgelempore bzw. Messstelle unter der Decke beträgt jeweils nur etwa 1 K, nie mehr als 2°C. Im Laufe des Tages steigt die Temperatur, auch durch die Kirchenbesucher, von etwa 13°C auf etwa 15°C an. Die Wandtemperatur liegt über 10°C, und damit weit genug vom Taupunkt entfernt. Die relative Feuchtigkeit liegt mit 50% im gewünschten Bereich und nimmt während des Gottesdienstes leicht zu.

C.1.5 Dom zu Brixen

Der Dom in Brixen ist ein Beispiel für eine instationär und nicht geregelt betriebene Luftheizung - die erstaunlich gut funktioniert.

Die Kirche wird täglich genutzt (sonntags von 6:30-12:30 Uhr für 5 Gottesdienste, werktags von 6:30-10:00 Uhr für 4 Gottesdienste) und mit 30-35°C warmer Luft beheizt, die im Altarraum in den Raum eingeblasen und im hinteren Bereich sowie im Querhausarm wieder abgezogen wird. Die Heizung läuft jeweils morgens für 2 Stunden vor dem ersten Gottesdienst, und bei Bedarf im Laufe des Vormittags noch einmal für etwa 1 Stunde. Gesteuert wird die Anlage im Wesentlichen manuell vom Sakristan - der schon bei der Installation der Heizung vor 30 Jahren im Dienst war. Eine automatische Steuerung wäre zwar vorhanden, wird aber nicht genutzt.

Die Raumklimamessung [Troi, 2002b] erfolgte vom 1.3. bis 27.3.2002 mit 26 Sensoren (u.a. für drei vertikale Profile), davon 3 Sensoren für Temperatur und Feuchtigkeit.

Die Temperaturen im Brixner Dom zeigen einen für Luftheizungen typischen Verlauf:

Während des Heizens steigen die Lufttemperaturen im Raum rasch an, um nach Abschalten der Heizung langsamer wieder abzuklingen. Die Temperaturerhöhung beträgt im Aufenthaltsbereich etwa 2K an Werktagen und 4K an Sonntagen, auf der Orgelempore 4-5K und unter der Decke 6-7K. Dies bedeutet zwar, dass sich ein beträchtlicher Teil der investierten Energie unter der Decke sammelt, die Temperaturunterschiede sind jedoch im Vergleich zu anderen untersuchten Objekten nicht überdurchschnittlich hoch und deuten auf ein vergleichsweise gutes Funktionieren des Systems hin. Zwischen den Heizperioden ist die Temperatur im gesamten Raum sehr ähnlich und steigt von anfangs etwa 9°C auf 11°C am Ende an. Auffallend ist, dass die Temperatur bei den Messstellen im oberen Teil der Kirche durch die Sonnenstrahlung zum Teil merklich ansteigt. Im Aufenthaltsbereich dagegen ist der Einfluss der Sonne gering.

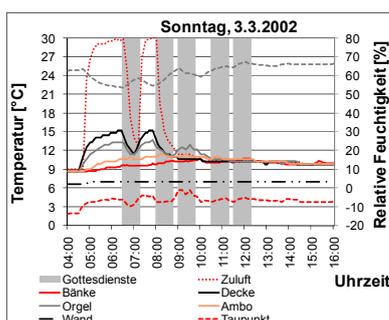


Abbildung C.7: Typischer Temperaturverlauf an einem Sonntagmorgen (hier: 3.3.2002) für unterschiedliche Messstellen

Die Oberflächentemperatur im Sockelbereich ändert sich während des Heizens kaum, und liegt zudem deutlich unter den Lufttemperaturen - Kondensation war im Messzeitraum dennoch nicht zu erwarten. In feuchteren Wintern oder durch zusätzliche Feuchtigkeitsquellen im Raum könnte die Situation jedoch kritisch werden. Während des Heizens sinkt die relative Feuchtigkeit bei der Orgel um 10 - 15%, im Bereich des Ambos sind die Einbrüche wesentlich schwächer. Dass die relative Feuchtigkeit nicht weiter sinkt, hängt damit zusammen, dass gleichzeitig mit der Temperatur auch die absolute Feuchtigkeit steigt (0.5-1g/m³ werktags, 2g/m³ sonntags). Als Feuchtigkeitsquellen kommen die Kirchenbesucher, der Heizkanal und die Holzeinrichtung in Frage.

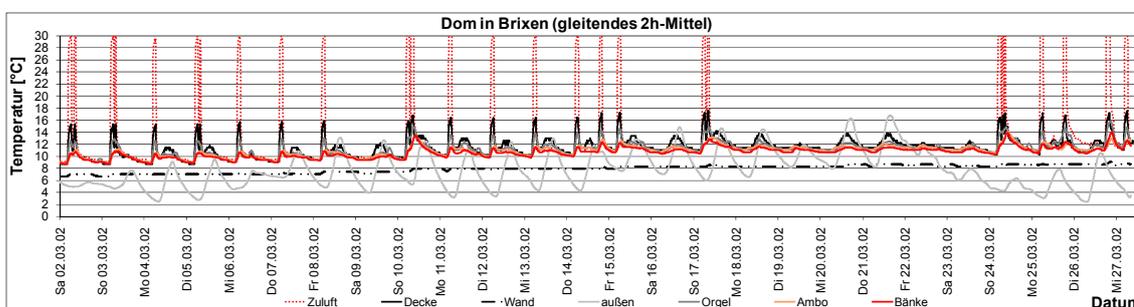


Abbildung C.8: Übersicht. Verlauf ausgewählter Temperaturen während der Messperiode

C.1.6 Pfarrkirche Dorf Tirol

Die Pfarrkirche zum hl. Johannes dem Täufer in Dorf Tirol wird seit 1969 mit einer Luftheizung temperiert: Die 30-35°C warme Luft strömt über zwei Zuluftgitter rechts und links im Altarraum ein und wird über das Abluftgitter hinten rechts wieder abgezogen. Die Heizung wird instationär betrieben und jeweils 1.5-2 Stunden vor den Gottesdiensten eingeschaltet.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 26.2. bis 26.3.2001 mit 23 Datenloggern (6 im Aufenthaltsbereich, 3 an Oberflächen, 6 für 2 Höhenprofile, je 2 bei Orgel und Hochaltar oben und unten, je 1 bei Beichtstuhl, hinter der Orgel und außen), davon 4 mit Feuchtigkeitssensor (Hochaltar, Orgel, Zuluft, außen). Während der Messzeit fand täglich mindestens ein Gottesdienst statt, von Freitag 9.3. bis Sonntag 11.3. war die Kirche im Rahmen der Gebetstage besonders oft genutzt.

Typisch für eine Luftheizung steigt die Temperatur im Kirchenschiff wesentlich rascher an als in den Bänken. Mit Eintreffen der Gläubigen steigt sie dann auch im Bankbereich (und auf der Orgelempore) an, um jeweils 3-4 K - was auch dem Anstieg ohne Beheizung entspricht (vgl. Abbildung C.9 und Abbildung C.10).

Beim Heizen steigt die abs. Feuchte um 1-2 g/m³, was nur zum Teil auf die von Kirchenbesuchern eingebrachte Feuchte zurückzuführen ist. Dafür, dass ein beträchtlicher Teil der Feuchtigkeit von Holz u.Ä. abgegeben wird, spricht, dass die abs. Feuchte im Bereich der Orgel stärker ansteigt als beim Tabernakel: Bedingt durch die höhere Temperatur in größerer Höhe, sinkt die rel. Feuchte bei der Orgel ab - und das Holz wirkt diesem Trend durch Abgabe von Wasser an die Luft entgegen.

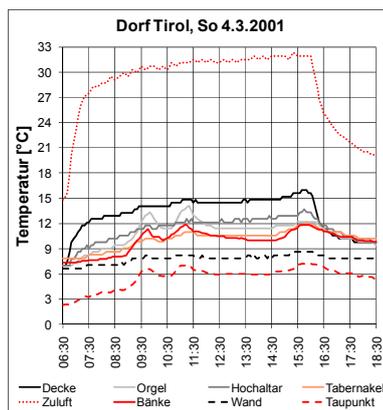


Abbildung C.9: Temperaturverlauf am Sonntag 4.3.2001 (Heizsaison). Gottesdienste um 9:00 und 10:30 Uhr, Taufe am Nachmittag. Nach den Gottesdiensten pendelt sich am 3.4.2001 - die Heizung läuft bis zur Taufe am Nachmittag durch - ein stationäres Temperaturprofil im Raum ein

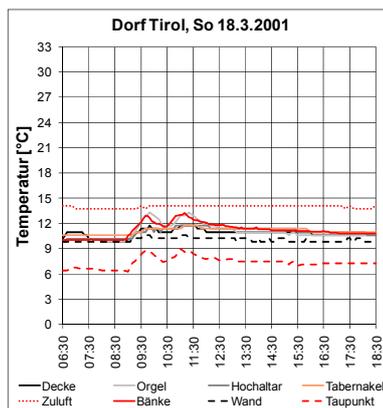


Abbildung C.10: Temperaturverlauf am Sonntag 18.3.2001 (nach Heizsaison). Gottesdienste um 9:00 und 10:30 Uhr

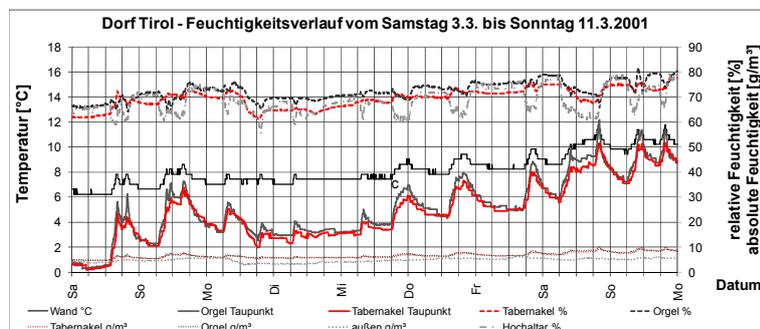


Abbildung C.11: Verlauf der absoluten Feuchtigkeit, der relativen Feuchtigkeit und des Taupunktes (im Vergleich zur Oberflächentemperatur) über eine Woche. Der Taupunktabstand sinkt regelmäßig unter 1K, es besteht Kondensationsgefahr

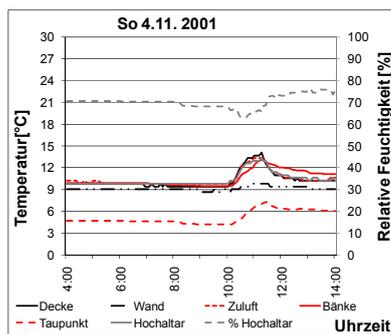


Abbildung C.12: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 4.11.2001 (vor Heizsaison)

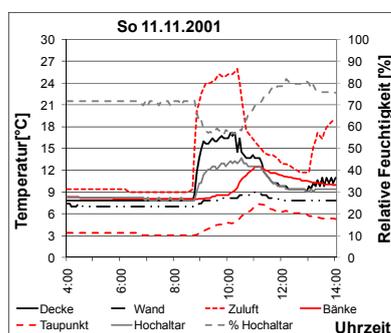


Abbildung C.13: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 11.11.2001

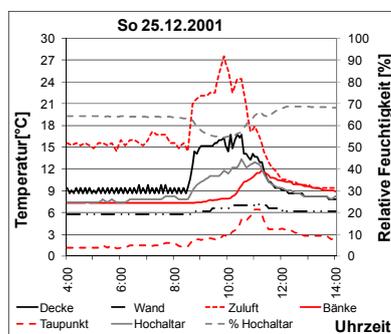


Abbildung C.14: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 25.11.2001 (vor Gottesdienst Grundheizung)

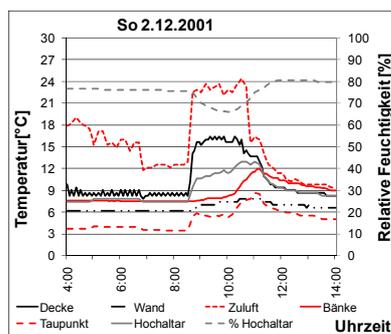


Abbildung C.15: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 2.12.2001 (vor Gottesdienst Grundheizung)

C.1.7 Pfarrkirche Gais

Da die Pfarrkirche zum hl. Evangelisten Johannes in Gais - und insbesondere deren Orgel - saniert werden sollten, und die Kirche zum Teil deutlich geschwärzte Oberflächen aufwies, wofür auch die Heizung verantwortlich gemacht wurde, wurde im Rahmen der Sanierung auch an eine Erneuerung der Heizungsanlage gedacht. Die Raumklimauntersuchung [Troi, 2002f] sollte mit einer Analyse des Ist-Zustandes und der vorhandenen Schwachstellen die Entscheidungsfindung der Verantwortlichen erleichtern, und erfolgte vom 25.10. bis 21.12.2001 mit insgesamt 19 Datenloggern (6 im Aufenthaltsbereich, 2 an Oberflächen, 7 für 3 Höhenprofile, je 1 für Zuluft, Orgel, Hochaltar und außen), davon 3 auch mit Feuchtigkeitssensor (Hochaltar, Orgel, Zuluft).

Die Kirche ist mit einer Luftheizung ausgestattet, welche 28°C warme Luft durch das Zuluftgitter in der Orgelbrüstung in den Raum bläst. Die Heizung wird jeweils 1 Stunde (an den Wochenenden 1.5 Stunden) vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet. Zudem wird sie automatisch aktiviert, wenn die Grundtemperatur von 8°C im Kirchenraum unterschritten wird. Bis zum 10.11.2001 war die Heizung noch nicht in Betrieb. Ab diesem Zeitpunkt wird die Heizung anfangs nur für die Gottesdienste, später auch zum Halten der Grundtemperatur aktiviert.

Typisch für Luftheizungen steigt die Temperatur oben im Raum am schnellsten an. Die Temperaturerhöhung unter der Decke beträgt bis zu 8K. Dies bedeutet, dass sich ein beträchtlicher Teil der investierten Energie unter der Decke sammelt, während die Temperatur im Aufenthaltsbereich erst mit Eintreffen der Gläubigen steigt - um 4–5 K wie schon vor der Heizsaison (vgl. Abbildungen C.12 und C.13). Verdienst der Heizung ist die „Grundtemperatur“ im Raum. Aber das schafft das „Grundheizen“ allein auch - bei mit etwa 2–3 K deutlich geringerem Temperaturprofil (Abbildung C.15). Die Energie des „Gottesdiensttheizens“ verpufft unter der Decke.

Ein Verzicht auf das Gottesdienstheizen würde nicht nur bei gleichbleibender Behaglichkeit Energie sparen helfen, sondern auch die Einbrüche der relativen Luftfeuchtigkeit am Hochaltar (um 10-15%) und bei der Orgel (um 5-10%) vermeiden, was das Holzinventar schont, sowie durch (i) die geringeren Luftströmungen (kleinere Temperaturdifferenzen) und (ii) etwas geringere Feuchtezunahme (Desorption entfällt) die Gefahr der Schwärzung reduzieren.

C.1.8 Kirche zum hl. Anton in Kaltern

Am 30.11.2001 wurde in der Kirche zum hl. Anton (kleine Kirche, etwa 70 Sitzplätze) ein Quarzheizsystem (mobiles Strahlungselement, STONEFIRE) getestet [Troi, 2002c]. Obwohl es sich nicht um eine länger andauernde Raumklimamessung wie in den anderen in Abschnitt C.1 dargestellten Kirchen handelt, werden Versuchsaufbau und Ergebnis hier geschildert.

Sowohl die Behaglichkeit für die Kirchenbesucher als auch Auswirkungen aus Sicht der Denkmalpflege waren Gegenstand der Untersuchung (Versuchsaufbau in Abbildung C.16).

Ergebnis aus Sicht der Kirchenbesucher:

Im Altarbereich ist der Einfluss der Strahlung auf die empfundene Temperatur groß (siehe Abbildung C.18, Phase IV). Im Kirchenschiff dagegen ist er zwar noch erkennbar, aber sehr klein (Abbildung C.18, Phasen I und II). Die Lufttemperatur ändert sich durch die Heizung - bei der untersuchten Heizdauer - praktisch gar nicht. Wer nicht im Strahlungsbereich der Heizung steht, hat keinen Nutzen - aber es ist unmöglich, die Heizkörper so zu positionieren, dass allen Gläubigen in den Bänken gedient ist. Sehr wohl ist es jedoch möglich, in Teilbereichen für angenehmes Klima zu sorgen (Altar, Lesepult).

Ergebnis aus Sicht der Denkmalpflege:

Das Raumklima wird nicht negativ beeinflusst, solange nicht

1. die Heizung über sehr lange Zeiten in Betrieb bleibt, denn dann würde (i) die Lufttemperatur doch steigen und (ii) könnte die - relativ geringe - Zunahme der Luftgeschwindigkeit direkt beim Heizgeräte bei ungünstiger Positionierung die Ablagerungsrate an Wänden doch steigern.
2. oder Oberflächen (speziell Holz) aus geringer Entfernung direkt angestrahlt werden (die „Streifstrahlung“ am Altar hat sich nicht auf die Temperatur des Holzes ausgewirkt).

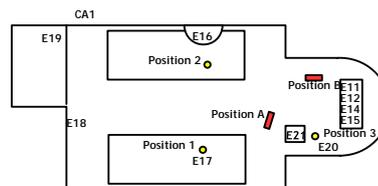


Abbildung C.16: Versuchsaufbau (i) rot die Positionen (A, B) des Heizgerätes, (ii) gelb die 3 Positionen der Mikroklimatester („heat stress and comfort analyser“ HSA-832 der Firma TCR Tecora) und (iii) die Positionen der Datenlogger HOBO H08-001-02, bzw. H08-032-08 (E11 $\vartheta_{Oberfläche}$ Hochaltar unten, E12 ϑ_{Luft} Tabernakel, E14 ϑ_L Tabernakel, E15 ϑ_O Hochaltar oben, E16 ϑ_O Kanzel, E17 ϑ_L Bank, E18 ϑ_O Westwand 3m, E19 ϑ_L Orgelempore, E20 ϑ_O Südwand 0.7m, E21 ϑ_L beim Ambo, CA1 ϑ_L außen)

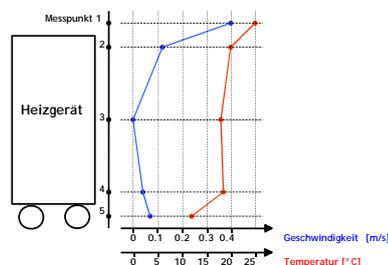


Abbildung C.17: Profil von Lufttemperatur und -geschwindigkeit in unmittelbarer Nähe des Heizgerätes

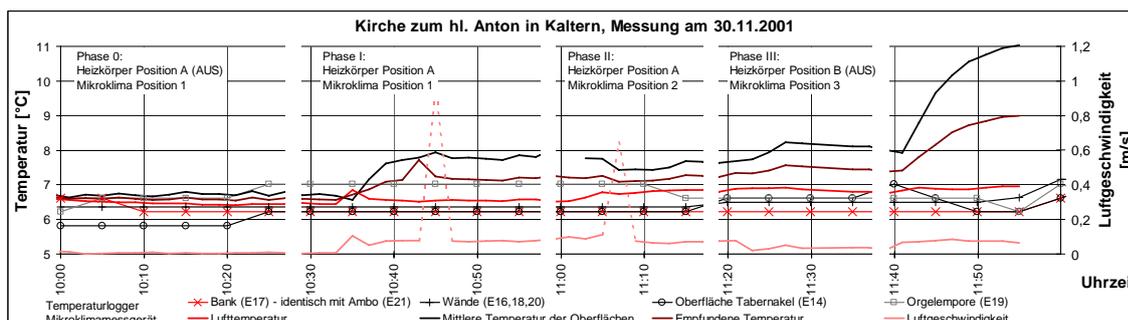


Abbildung C.18: Ergebnisse der Mikroklimatestermessung sowie der Luft- und Oberflächentemperaturen in einzelnen Versuchsphasen

C.1.9 Pfarrkirche Karneid



Abbildung C.19: Zuluftgitter über dem neugotischen Beichtstuhl

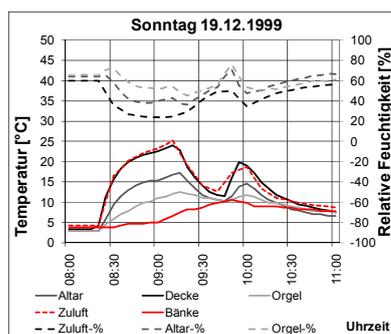


Abbildung C.20: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 19.12.2001. Gottesdienstbeginn um 9:00 Uhr

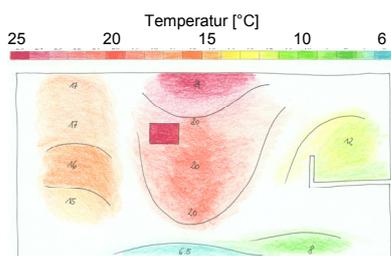


Abbildung C.21: Temperaturverteilung am Sonntag, 19.12.2001 um 9:15 Uhr

Die Pfarrkirche zum hl. Vitus in Karneid hat eine aus dem Jahre 1876 stammende neugotische Einrichtung (Orgel, Gestühl, gefasster Altar, Kreuzwegstationen). Klimamessungen von Pescoller [1999] im Frühjahr 1991 wegen eines Holzschädlingsbefalls ergaben eine hohe rel. Feuchtigkeit (80 bis 90%), die dem Boden zugeschrieben wurde. Im Rahmen der Friedhofserneuerung wurde die Kirche deshalb trockengelegt.

Die Luftheizung bläst 25°C warme Luft durch ein Zuluftgitter in 6m Höhe in den Raum und zieht sie durch das Abluftgitter im darunter befindlichen Beichtstuhl wieder ab. Die Heizung wird 30 Minuten vor Gottesdienst eingeschaltet und während diesem mit Thermostat auf 10°C Raumtemperatur geregelt.

Die Raumklimamessung [Troi, 2000d] vom 11.12. bis 20.12.1999 mit insgesamt 24 Datenloggern (6 im Aufenthaltsbereich, 8 an Oberflächen, 8 für 2 Höhenprofile, je 1 für Zuluft und außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, Zuluft, außen), wurde durch ein Feuchtemonitoring vom 22.3. bis 16.4.2001 (3 Temperatur- und Feuchtlogger an Hochaltar, Zuluft, außen und 1 Temperatursensor an der Orgel) ergänzt.

Die relativ weit oben im Raum einströmende Heizungsluft sammelt sich im Wesentlichen im oberen Teil der Kirche. Der Aufenthaltsbereich wird zu einem beträchtlichen Teil von den Kirchengängern selbst erwärmt. Es können Temperaturdifferenzen von bis zu 8°C innerhalb der Höhenprofile und 15°C zwischen Bankbereich und Deckenbereich beobachtet werden.

Die relative Feuchte am Zuluftgitter schwankt (ohne Heizung) zwischen 60 und 70%. Nimmt man dieselbe absolute Feuchte für den Kirchenraum an (Sensor am Altar defekt), ergeben sich für Altar und Orgel um 5% höhere Werte. Beim Heizen sinkt die rel. Feuchte der Zuluft auf 25% (obwohl die abs. Feuchte um 2-3g/m³ zunimmt). Für Orgel und Altar ergeben sich daraus Einbrüche von 20-30% respektive 25-30%. Das Feuchtemonitoring 2001 bestätigt den obigen Näherungsansatz: Die abs. Feuchte steigt im Kirchenraum gleich stark an wie in der Zuluft, sinkt jedoch etwas langsamer - d.h., die Feuchteminima bei Orgel und Altar dürften etwas gedämpfter ausfallen. Im Frühjahr liegt die rel. Feuchte bei 70-80%, sinkt dann auf 55-65%. Größten Einfluss hat im Frühjahr das Außenklima: (i) folgt die abs. Feuchte innen jener außen und (ii) verursacht die Aufheizung durch die Sonne in dieser Jahreszeit die größeren Feuchteeinbrüche als die Heizung.

C.1.10 Pfarrkirche Kuens

In der Pfarrkirche zu den hll. Mauritius und Korbinian in Kuens wurde vom 11.-19.11.1999 zur Probe eine Strahlungsheizung aufgestellt und deren Einfluss auf die Temperatur- und Feuchteverteilung im Raum gemessen - mit 26 Datenloggern (7 im Aufenthaltsbereich, 8 an Oberflächen, 10 für 2 Höhenprofile und 1 außen), davon 2 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, außen). Das mobile, am Boden stehende Strahlungsheizgerät wird elektrisch in drei Leistungsstufen betrieben. Insgesamt waren 3 Heizöfen im Raum verteilt: einer im Altarraum, einer vor den Bankreihen, einer im hinteren Bereich der Kirche.

Die Kirche reagiert insgesamt sehr träge auf das Außenklima: Tagesschwankungen bilden sich im Innenraum keine ab, ein Einfluss der Sonneneinstrahlung ist auch nicht erkennbar. Insgesamt sinkt die Temperatur im Raum während der nicht beheizten Zeiten von anfangs etwa 10°C auf am Ende 7°C, während die Temperatur außen von etwa 5°C auf 1°C sinkt.

Die Wirkung der Strahlungsheizung ist erwartungsgemäß lokal ziemlich begrenzt. Durch die relativ lange Vorheizzeit steigt die Temperatur im Raum im Mittel um knapp 1 bis gut 2K (je nach Heizleistung, siehe Abbildung C.22). Die Heizung löst keine Feuchteschwankungen aus. Der durch die Kirchenbesucher selbst bei den Gottesdiensten am Samstag und am Sonntag ausgelöste Temperaturanstieg übertrifft mit 2.5K den obigen Heizungseffekt - vor allem im Aufenthaltsbereich.

Beim Betrieb der Luftheizung (die einmal, am Mittwoch 17.11.1999 für 1 Stunde in Betrieb ist) stellt sich hingegen ein ausgeprägtes Temperaturprofil im Raum ein: Ausgehend von 8°C steigt die Temperatur unter der Decke auf über 20°C, während im Altarraum gerade einmal 11°C erreicht werden.

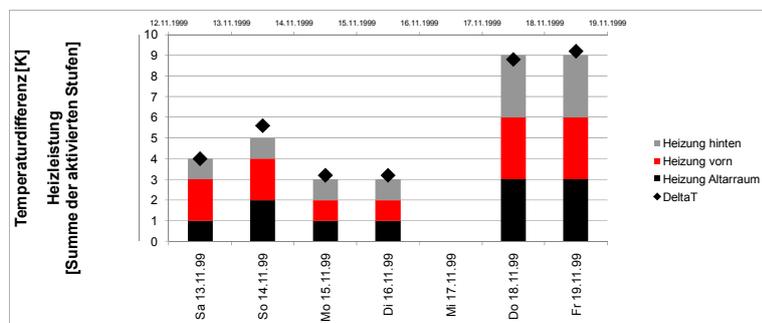


Abbildung C.22: Vergleich von Heizleistung und mittlerem Temperaturanstieg im Raum

C.1.11 Pfarrkirche Laag

Die Pfarrkirche Maria Unbefleckte Empfängnis in Laag ist mit einer Luftheizung ausgestattet, die 40-45°C warme Luft durch das Zuluftgitter in der Seitenwand des Altarraums auf halber Raumhöhe einbläst. Die Heizung wird instationär betrieben.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 17.1 bis 31.1.2000 mit 17 Datenloggern (7 im Aufenthaltsbereich, 1 an Oberflächen, 7 für 3 Höhenprofile, je 1 für Zuluft und außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, Zuluft, außen).

Die Temperatur im Kirchenschiff und vor allem unter der Decke steigt beim Heizen rasch an und es entsteht ein ausgeprägtes Temperaturprofil, nicht nur zwischen Decke und Aufenthaltsbereich (10-12K), sondern auch über die Höhe des Kirchenschiffes (ΔT vorn 4-5K, mitte 3-4K, Orgel 2-3K), sowie über die Länge (ΔT vorn - mitte - Orgel von je 2K).

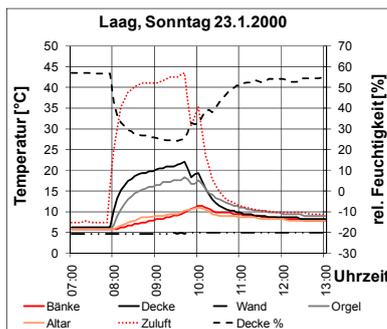


Abbildung C.23: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 23.1.2000, Gottesdienst um 9:30 Uhr

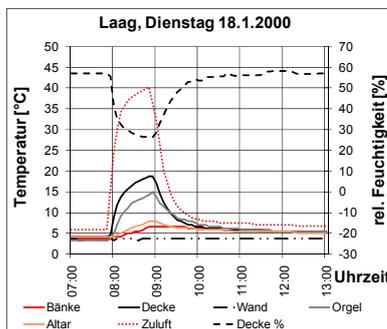


Abbildung C.24: Temperatur und Feuchtigkeit am Dienstag, 18.1.2000, Gottesdienst um 8:30 Uhr

Die Wandtemperatur im Sockelbereich schwankt zwischen 3 und 5°C. Kondensation ist im Messzeitraum nicht zu befürchten: Trotz Feuchtzunahme beim Heizen (sonntags 1-2g/m³, werktags 0.5-1g/m³) wird ein Taupunktabstand von 2K nie unterschritten. Die abs. Feuchte schwankt zwischen 3 und 4g/m³ (Mittel 3,5g/m³) und folgt mit gewisser Verzögerung der Außenfeuchte, die aber stärker schwankt (1,5-5g/m³) und im Mittel niedriger ist (2,75g/m³).

Die relative Feuchtigkeit schwankt abgesehen von den Heizergebnissen zwischen 50% und 60%, außenklimabedingt sinkt sie für mehrere Tage sogar auf 40%. Den oben beschriebenen Temperaturspitzen beim Heizen entsprechen auch bedeutende Einbrüche der relativen Feuchtigkeit: unter der Decke um 30%, bei der Orgel um 25% - dort zudem mit einer Differenz von 5-10% über die Höhe der Orgel.

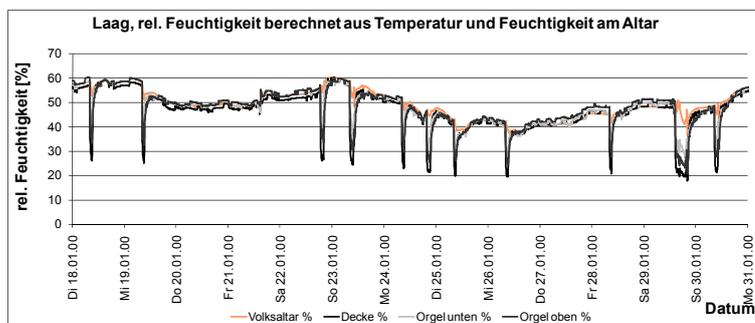


Abbildung C.25: Heizbedingte Einbrüche der relativen Feuchtigkeit in Laag

C.1.12 Pfarrkirche Lüsen

Die Pfarrkirche zum hl. Georg in Lüsen ist mit einer Bankheizung ausgestattet, welche für die Gottesdienste aktiviert wird, und zudem eine Grundtemperatur in der Kirche hält.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 25.10.2001 bis 24.2.2002 mit 13 Datenloggern (5 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 2 bei der Orgel, je 1 bei Kanzel und außen), davon 4 mit Feuchtigkeitssensor (Orgel, Bank, Altar, außen).

Typisch für Bankheizungen ist es beim Heizen in den Bänken am wärmsten. Während der etwa 4-stündigen Heizereignisse an Sonntagen steigt die Temperatur in den Bänken um 7-9K, im Kirchenschiff (Altarraum, Orgel, Beichtstuhl) um 4-5K. An Werktagen läuft die Heizung nur 2 Stunden, die Temperatur steigt in den Bänken um 2-4K und im Kirchenschiff um 1-2K.

Auch beim Halten der Grundtemperatur, bildet sich ein Temperaturgefälle zwischen Bänken und Kirchenschiff aus. Vom 27.-28.12.2001 bspw. läuft die Bankheizung während 50% der Zeit jeweils für 2-3 Stunden (Abbildung C.28). Bei einer mittleren Außentemperatur von -6.7°C hält die Heizung damit in den Bänken 6.3°C (± 1.2), im Kirchenschiff 4.2°C (± 0.5). An der Wand sinkt die Temperatur knapp über den Gefrierpunkt - und liegt damit während mehr als der Hälfte der Zeit unter dem Taupunkt.

Kondensationsgefahr besteht in Lüsen aber bei praktisch jedem Heizereignis (Abbildung C.29). Die Raumklimamessung zeigt auf, dass mit jedem Heizen Feuchtigkeit aus dem Bankspiegel desorbiert wird, die sich dann an den Wänden niederschlägt (siehe Abschnitt 4.5.4). Damit ist die Ursache für die extrem starke Verschmutzung im Bereich der Decke und der Wände (Abbildung C.26) gefunden.



Abbildung C.26: Verschmutzung der Wände in der Pfarrkirche von Lüsen

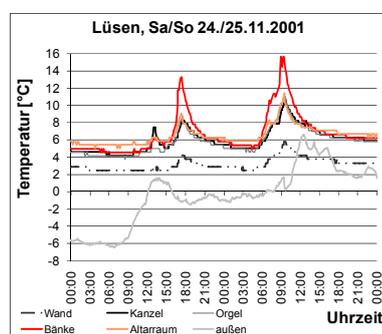


Abbildung C.27: Temperaturverlauf am Sa/So, 24./25.11.2001.

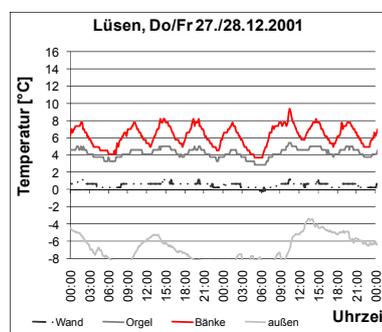


Abbildung C.28: Temperaturverlauf am Do/Fr, 27./28.12.2001, Grundtemperieren

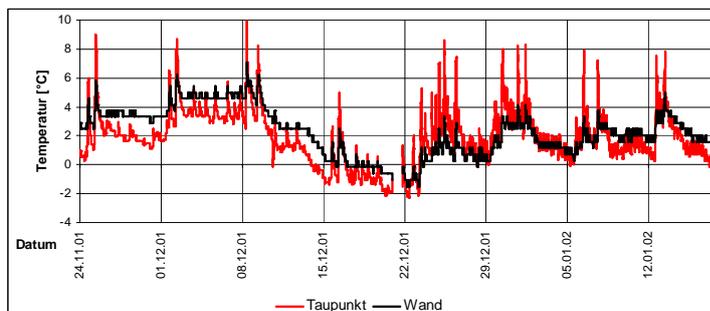


Abbildung C.29: Typischer Temperaturverlauf in Lüsen

C.1.13 Pfarrkirche Neumarkt

Die Pfarrkirche zum hl. Nikolaus in Neumarkt wird seit 1987 mit einer Fußbodenheizung temperiert.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 4.12.1999 bis 28.2.2000 sowie vom 19.4. bis 17.5.2000 mit 22 Datenloggern (2 im Aufenthaltsbereich, 11 an Wandoberflächen, 4 für oberflächen-nahe Temperatur, 4 am Fußboden und 1 bei der Orgel), jener im Bankbereich war zusätzlich mit Feuchtigkeitssensor ausgestattet.

Im Aufenthaltsbereich der Kirchgänger und am Volksaltar herrschen während der Winter-Messperiode konstante 14-15°C, die nur von kurzen Anstiegen um bis zu 2K während der Gottesdienste unterbrochen werden (Abbildung C.31). Auf der Orgelepore ist es etwas kälter (2-3K), die Oberflächen an der Südwand liegen im selben Bereich, jene an der Nordwand und im Altarraum noch einmal 2-3K tiefer. Dass das Temperaturprofil im Januar (~6 K) größer ist als im Februar (~4 K), zeigt den Einfluss der Außentemperatur auf.

Während des Frühjahrs, wenn nicht mehr geheizt wird, steigt die Temperatur im Laufe des Monats auf über 20°C. Ein Temperaturprofil ist nicht mehr zu erkennen.

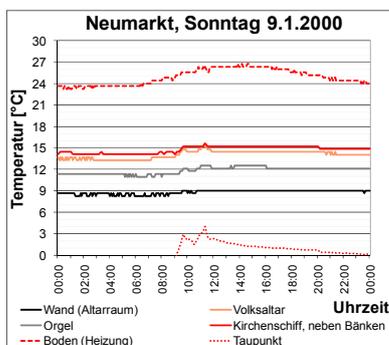


Abbildung C.30: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von Neumarkt - beispielhaft am Sonntag 9.1.2000 dargestellt, Gottesdienste um 8.30 und 10.15 Uhr

Mit 30-40% ist die relative Feuchtigkeit über die gesamte Wintermessperiode sehr niedrig. Zu kurzfristigen Erhöhungen von etwa 10% kommt es während der Gottesdienste, wenn durch die Besucher die absolute Feuchtigkeit um 2g/m³ steigt. Im Frühjahr lag die relative Feuchtigkeit mit 55-75% deutlich höher, durch die stark ansteigende absolute Feuchte konnte es nun trotz der hohen Oberflächentemperatur bei Gottesdiensten evtl. sogar zu Kondensation kommen.

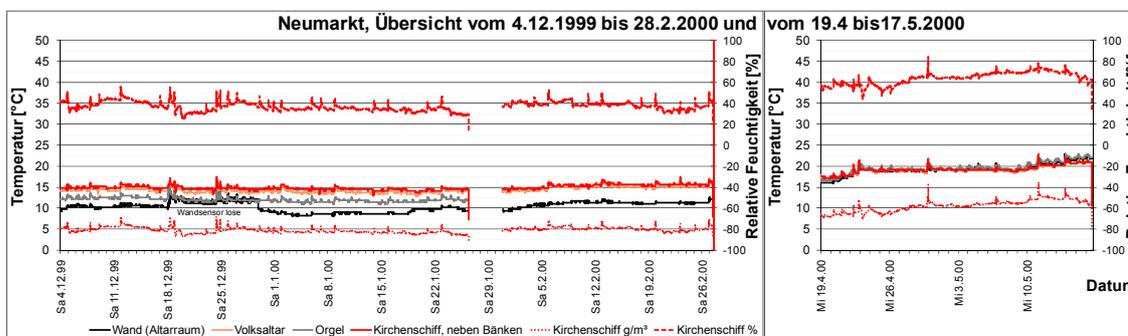


Abbildung C.31: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf in Neumarkt während der Winter-Messperiode (links) und einer zweiten Messreihe im Frühjahr (rechts)

C.1.14 Pfarrkirche Penon

Die Pfarrkirche zum hl. Nikolaus in Penon wird mit einem in der Mitte des Kirchenschiffs von der Decke hängenden kreisförmigen Gas-Strahler während der Gottesdienste beheizt.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 15.2. bis 14.3.2002 mit 11 Datenloggern (3 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 2 fürs Höhenprofil, je 1 bei Orgel und über der Strahlungsheizung), davon jener am Volksaltar mit Feuchtigkeitssensor.

Mit Einschalten des Strahlers steigt die Temperatur im Raum rasch an. Oben im Raum (sowohl im Altarraum als auch auf der Orgelempore) auf etwa 16°C, auf halber Höhe etwa 2 K weniger und unten im Altarraum noch einmal 2 K weniger. Im Bankbereich steigt die Temperatur ähnlich stark wie auf halber Höhe im Kirchenraum, an Sonntagen auf etwa 12-13°C, an Werktagen etwas weniger. Kirchenbesucher im direkten Einflussbereich des Strahlers (der Großteil) profitieren außerdem von der Strahlungswärme. Direkt über der Strahlungsheizung steigt die Lufttemperatur bei deren Betrieb auf 35-45°C.

Die abs. Feuchte im Kirchenraum schwankt während der nicht beheizten Zeiten um 6g/m³ und steigt beim Heizen um gut 3g/m³ (Sa/So) bzw. 1-2g/m³ (werktags). Dennoch sinkt die rel. Feuchte auf Höhe der Orgelempore von 80-90% auf 60% ab. Im Bereich der Bänke sinkt sie erst nach dem Gottesdienst - wenn die abs. Feuchte schneller abnimmt als die Temperatur.

Der hohe Feuchteintrag führt dazu, dass an den Wänden häufig Kondensationsrisiko besteht: Im Sockelbereich wird der Taupunkt bei praktisch jedem Heizereignis überschritten, und auch dazwischen ist der Taupunkt Abstand gering (7% der Zeit <1K, fast 40% der Zeit kleiner 2K). An der Decke über der Orgelempore besteht vor allem zu den Gottesdiensten am Wochenende ein beträchtliches Kondensationsrisiko.

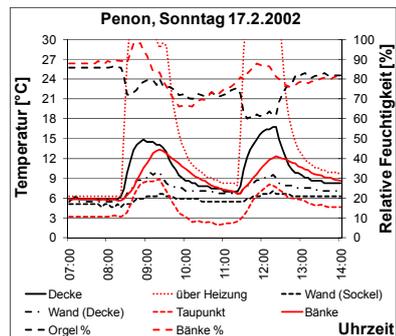


Abbildung C.32: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 17.2.2000, Gottesdienste um 8:30 und 11:30 Uhr; die Temperatur unter der Decke entspricht sehr gut jener auf der Orgelempore

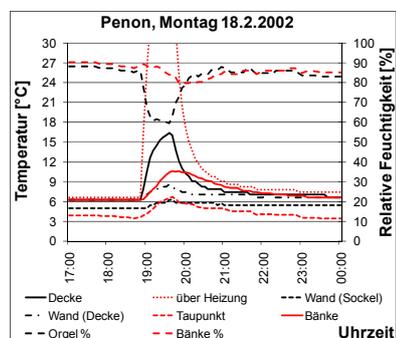


Abbildung C.33: Temperatur und Feuchtigkeit am Montag, 18.2.2000, Gottesdienste um 19:00 Uhr

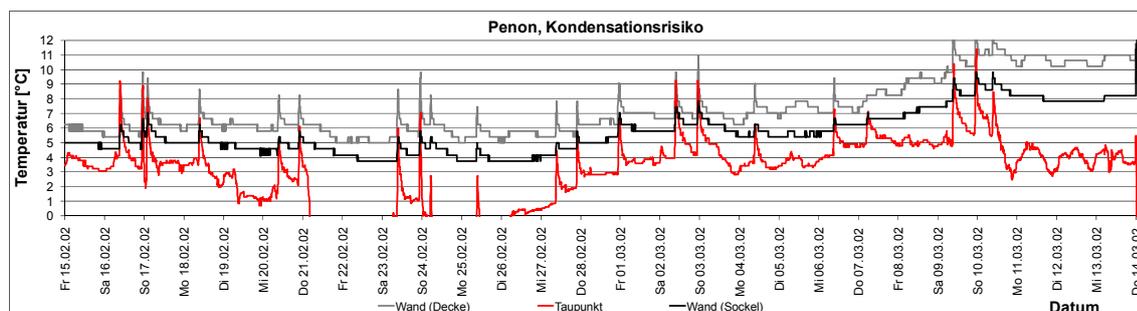


Abbildung C.34: Kondensationsrisiko in der mit Gasstrahler beheizten Kirche von Penon

C.1.15 Pfarrkirche Prad

Die Kirche Pfarrkirche Maria Königin in Prad hat seit Anfang der 70er Jahre des 20. Jh. eine Luftheizung: Die warme Luft (die mit 14-20°C eine der kälteste der in dieser Arbeit untersuchten Kirchen ist) wird im Bereich des Volksaltars eingebracht und hinten wieder abgezogen. Die Heizung wird nicht stationär betrieben, d.h., i.d.R. wird die Heizung 45-60 Minuten vor Beginn des Gottesdienstes eingeschaltet.

Die Raumklimamessung [Troi, 2000a] erfolgte vom 17.11. bis 10.12.1999 mit 24 Datenloggern (9 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 9 für 2 Höhenprofile, 1 Zuluft, 1 außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Volksaltar, Zuluft, außen).

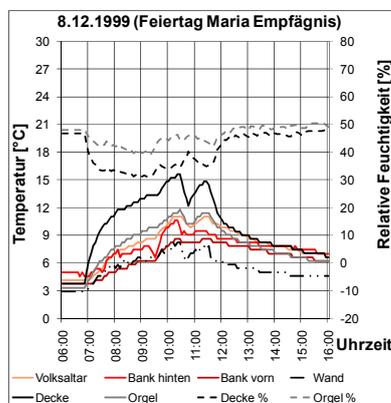


Abbildung C.35: Temperatur und Feuchtigkeit am 8.12.1999 (Feiertag, Mariae Empfängnis), Gottesdienste um 7:30 und 9:30 Uhr

Im vorderen Bereich der Kirche, über dem Zuluftauslass, bildet sich beim Heizen sehr schnell ein Temperaturprofil heraus: Unter der Decke entspricht die Temperatur in etwa der Zulufttemperatur, in 4 m Höhe ist es 3 K kälter und in den Bänken noch einmal 3-4 K kälter. Am hinteren Messprofil liegen die Temperaturen hingegen eng beieinander (1 K) und durchwegs unter jener des untersten Messpunkts im vorderen Profil.

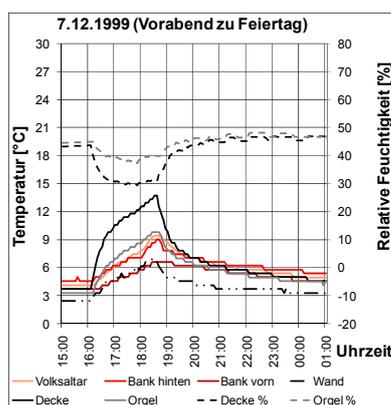


Abbildung C.36: Temperatur und Feuchtigkeit am 7.12.1999 (Vorabendgottesdienst zum Feiertag Mariae Empfängnis), Gottesdienste um 18:30 Uhr

Im Aufenthaltsbereich steigt die Temperatur langsamer, aber, wie das 2-stündige Vorheizen bei Vorabendgottesdiensten zeigt, durchaus auch ohne den Heizbeitrag der Kirchenbesucher (Abbildung C.36). Dennoch ist der zusätzliche Einfluss der Besucher gut erkennbar. Interessant zu beobachten ist, welchen Temperatureinbruch bei laufender Heizung das Öffnen der Türen verursacht (Abbildung C.35). Am kältesten ist es in den Bänken auf Höhe des Volksaltars - obwohl diese dem Warmluftauslass am nächsten sind: Die ausgeblasene warme Luft nimmt Luft aus der Umgebung mit in die Höhe, und kalte Luft aus dem Wandbereich strömt nach.

In der unbeheizten Kirche liegen die Temperaturen bei 3-6°C. Die Verteilung ist homogen, allein unter der Orgelempore ist es etwas wärmer, auf der Orgelempore etwas kälter. Die Oberflächen liegen bis zu 1K unter der Lufttemperatur.

Die absolute Feuchtigkeit ist während des betrachteten Zeitraum sowohl außen (2.65g/m³) als auch innen sehr niedrig (3.35g/m³). Kondensationsgefahr besteht unter diesen Umständen keine: Trotz Anstiegs um 0.5 bis 2g/m³ durch Heizen und Gottesdienste sinkt der Taupunkt Abstand nie unter 5 K. Die relative Feuchtigkeit ist mit 45-50% auch eher niedrig. Unter der Decke sinkt sie beim Heizen auf bis zu 30%.

C.1.16 Pfarrkirche Prettau

Die Pfarrkirche zum hl. Valentin in Prettau wird mit einer Bankheizung temperiert, die jeweils eine Stunde vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet wird.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 10.3. bis 7.4.2002 mit 14 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 2 fürs Höhenprofil, Hochaltar, HI-Geist-Altar, Orgel, außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (HI-Geist-Altar, Orgel, außen).

Die Kirche reagiert rasch auf Veränderungen des Außenklimas: Die Temperatur steigt zuerst von 3°C auf 5°C, um dann innerhalb von 4 Tagen auf den Gefrierpunkt zu sinken, und anschließend wieder auf 6°C anzusteigen. Auf Sonneneinstrahlung reagiert die Kirche mit Temperaturzunahme um gut 2K am Hochaltar, und etwas verzögert auch im übrigen Raum.

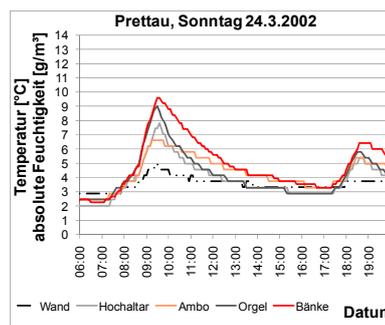


Abbildung C.37: Temperatur und Feuchtigkeit am 24.3.2002, Gottesdienste um 8:30 Uhr

Bis zum Gottesdienstbeginn steigt die Temperatur im Raum sehr homogen an: Sowohl in den Bänken als auch bei der Orgel und am Hochaltar oben steigt sie während der Stunde Vorheizen um 2-3K. Mit Ankunft der Kirchgänger steigt die Temperatur im Bankbereich und auf der Orgelempore stärker an (5-6K) als im Altarbereich (2-3K).

Während der einzelnen Heizereignisse steigt die abs. Feuchtigkeit schon in der Vorheizphase um etwa 1g/m³ an. Als Feuchtequelle kommt nur Desorption aus dem direkt bestrahlten Bankspiegel in Frage, da die relative Feuchtigkeit an den anderen Messstellen (Orgel, Hochaltar, ...) in diesen Fällen zunimmt. Weitere Feuchtigkeit kommt während des Gottesdienstes dazu. Dies führt dazu, dass es regelmäßig zu Kondensation von Feuchtigkeit an den Wänden kommt.

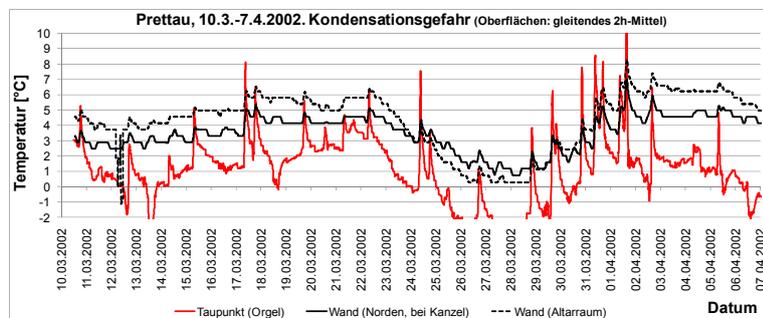


Abbildung C.38: Wandoberflächen- und Taupunkttemperatur in der Pfarrkirche von Prettau

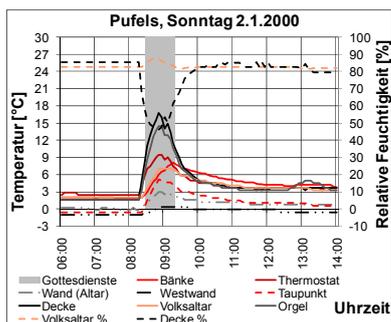


Abbildung C.39: Beispiel für Temperatur und Feuchte an Sonntagen. Unter der Decke steigt die T. auf 16-18°C, bei der Orgel auf 13-14°C. Sobald am Thermostat 10°C erreicht sind (nach etwa 30-45'), schaltet die Heizung aus, die T. sinkt wieder. In den Bänken ist es beim Aufheizen kälter als beim Thermostat, durch die anwesenden Gläubigen steigt die T. dort aber auch nach Abschalten der Heizung weiter an und erreicht gegen Ende des Gottesdienstes 8-10°C

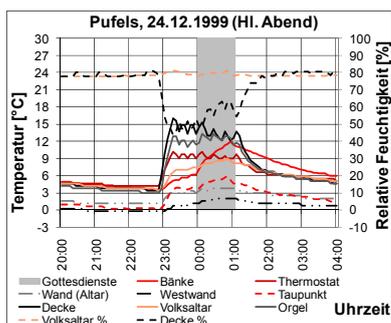


Abbildung C.40: Temperatur und Feuchte am 24/25.12.1999. Zu Weihnachten wurde die Heizung 1h vor Gottesdienstbeginn aktiviert, die Temperatur im Bankbereich steigt aber erst mit Eintreffen der Gläubigen nennenswert an

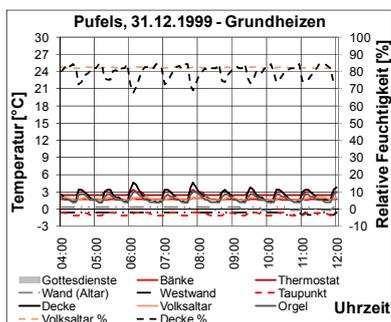


Abbildung C.41: Beispiel für Temperatur und Feuchte beim Grundtemperieren. Die vielen kurzen Heizimpulse bewirken ein Schwanken der Temperatur unter der Decke zwischen 1°C und 4°C um die relativ konstante Temperatur am Thermostat (2,5°C) und im Bankbereich (2°C)

C.1.17 Pfarrkirche Pufels

Die Pfarrkirche zum hl. Leonhard in Pufels wird mit einer Luftheizung temperiert: Die warme Luft wird beim Zuluftgitter vor den Bänken rechts eingeblassen und hinten im Raum durch ein zweites Gitter wieder abgezogen. Die Anlage hält eine Grundtemperatur von 3°C und hebt die Temperatur bei Gottesdiensten auf 10°C an (Thermostat hinter dem linken Seitenaltar). Dabei beträgt die Temperatur der Zuluft beim Heizen (i) während der Gottesdienste 25-35°C, (ii) zum Halten der Grundtemperatur jedoch nur etwa 10°C.

Die Raumklimamessung [Troi, 2001a] erfolgte vom 21.12.1999 bis 11.1.2000 mit 17 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 5 für 2 Höhenprofile, je 1 für Zuluft, Thermostat, Vorraum und außen), 2 mit Feuchtesensor (Volksaltar, außen).

Als Erstes und am stärksten erwärmt sich beim Heizen der Bereich unter der Decke, sodass zum Bankbereich eine Temperaturdifferenz von zum Teil über 10K entsteht (siehe Abbildungen C.39 und C.40). Wenn über mehrere Tage nicht für einen Gottesdienst geheizt wird, sinkt die Temperatur in der Kirche so weit ab, dass die Grundtemperierung aktiviert wird. Mit den vielen kurzen Heizimpulsen (etwa 1 jede Stunde) erzeugt diese eine recht homogene Temperaturverteilung (siehe Abbildung C.41).

Die Oberflächentemperaturen liegen zwischen den Heizperioden knapp über dem Gefrierpunkt, an der Westwand zum Teil sogar darunter. Beim Heizen steigen sie nur wenig (1-2 K an der Westwand, 2-3 K im Altarraum). Dies zusammen mit einer verhältnismäßig hohen abs. Feuchte im Raum (4-5g/m³ im Mittel, Spitzen von 6-8g/m³) führt dazu, dass große Bereiche der Wände kondensationsgefährdet sind - was Salzausblühungen und Feuchtflecken auch belegen.

Die Feuchtigkeit kommt mit Sicherheit nicht von der Außenluft - mit 2,5g/m³ liegt deren Mittel deutlich unter den Werten im Kirchenraum. Ob die Feuchtigkeit aus dem Luftkanal kommt oder durch die stark abfallende relative Feuchtigkeit beim Heizen in weiten Bereichen des Raumes Desorptionsprozesse in Gang kommen, lässt sich aufgrund der gemessenen Daten nicht endgültig klären.

C.1.18 Pfarrkirche St. Magdalena in Gsies

Die Kirche ist zum Zeitpunkt der Messungen mit einem Bankheizungssystem ausgestattet: Elektrisch betriebene Heizröhren unter den Sitzbänken werden jeweils 30' vor Gottesdienst eingeschaltet. Der Altarraum hat keine Heizung (Ausnahme: ein kleiner Elektro-Strahler ab 4.3.2000 beim Volksaltar).

Die Raumklimamessung [Troi, 2001c] erfolgte vom 3.2. bis 28.3.2000 mit 16 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 6 für 2 Höhenprofile, 1 für Orgel, 1 außen), davon 2 mit Feuchtigkeitssensor (außen, Ambo).

Die sich beim Heizen ausbildenden Temperaturzonen (unter der Decke ist es weniger warm als in den Bänken - Abbildung C.42) sind an und für sich erwünscht. Wermutstropfen ist, dass auch der Altarbereich klar zur kalten Zone gehört.

Kalt sind auch die Oberflächen (Abbildung C.44), deren Temperatur beim Heizen kaum zunimmt. Das bedeutet, dass (i) die empfundene Temperatur deutlich unter jener der Luft in den Bänken liegt und (ii) zusammen mit dem Feuchtigkeitsverlauf betrachtet Kondensationsgefahr besteht.

Nach Abschalten der Heizung sinkt die Temperatur rasch, nach 2h (werktags) und 3h (sonntags) sind die Ausgangswerte beinahe erreicht. Der Einfluss der Außentemperatur ist auch klar erkennbar: Während Luft und Oberflächen im Februar unter 0°C sinken, steigt die Temperatur im März auf 5°C. Das klare Temperaturprofil beim Heizen (Bänke ↑, Wände ↓, übriger Raum ~) sinkt zwischendrin auf eine homogene Temperatur, und kann sich sogar umkehren: Es gibt Zeiten, in denen die Wand deutlich wärmer als die Luft ist (Abbildung C.43).

In Abschnitt 4.5.3 ist das Verhalten der Kirche während einer längeren Heizperiode beschrieben.

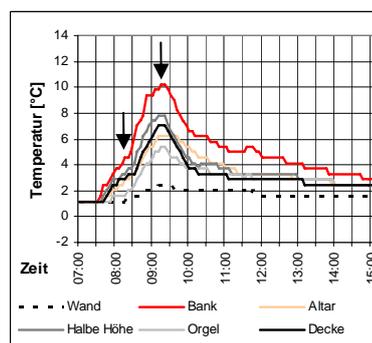


Abbildung C.42: Temperaturverlauf am Sonntag, den 13.2.2000, in der Pfarrkirche von St. Magdalena in Gsies: Wenn um 7:30 Uhr die Bankheizung aktiviert wird, herrschen im Raum (Luft und Oberflächen) 1°C. Zu Beginn des Gottesdienstes um 8:30 Uhr ist die Temperatur in den Bänken auf 6°C gestiegen, in Altarraum und beim Temperaturprofil auf 3.5-4°C, während es auf der Orgelempore erst während der Messe wärmer wird. Im Bankbereich steigt die Temperatur insgesamt auf 10-12°C, im Höhenprofil bleibt sie mit 7-8°C niedriger. Altarraum und Orgelempore weisen 6°C bzw. 5°C auf, und die Oberflächentemperatur gar nur 2.5°C.

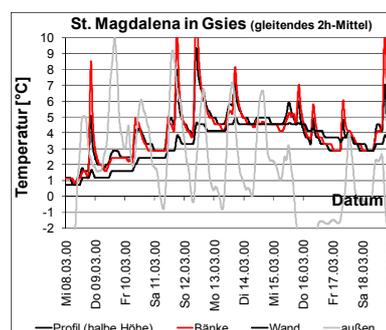


Abbildung C.43: Die Lufttemperatur folgt Änderungen der Außentemperatur recht schnell, während die Oberflächentemperatur der Wände träge nachhinkt: Steigt die Außentemperatur an, ist die Wand im Verhältnis besonders kalt, sinkt die Außentemperatur ab, ist die Wand oft wärmer als die Luft im Kirchenraum.

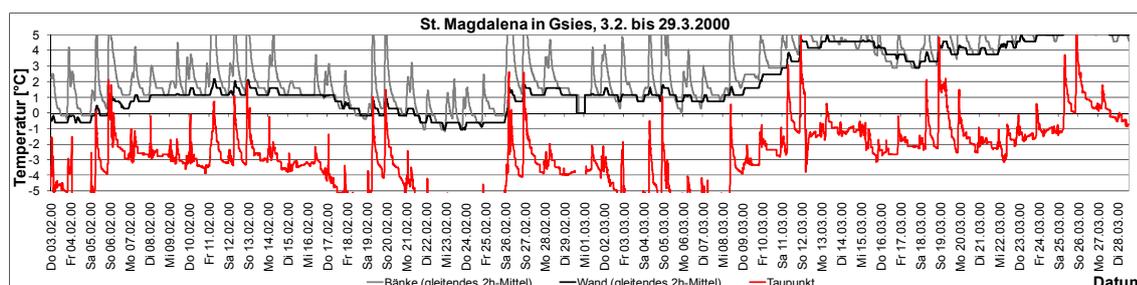


Abbildung C.44: Wandoberflächen- und Taupunkttemperatur in St. Magdalena in Gsies

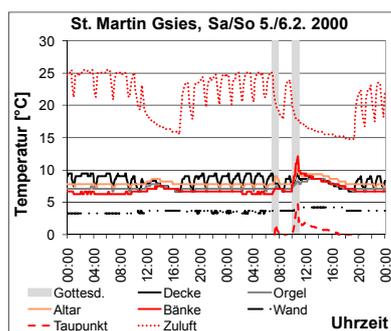


Abbildung C.45: Beispiel für Temperaturverlauf in der 1. Phase - Heizung nachts

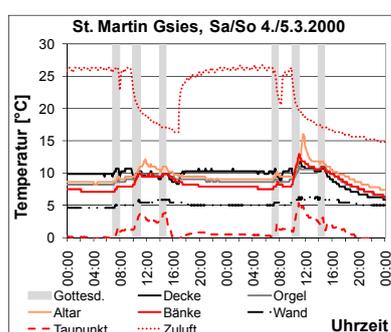


Abbildung C.46: Beispiel für Temperaturverlauf in der 2. Phase - Gebetstage

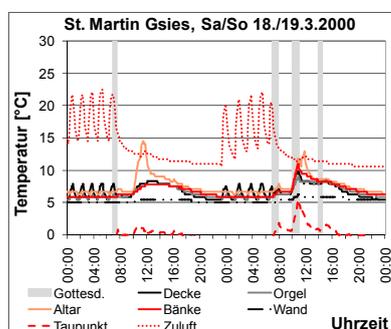


Abbildung C.47: Beispiel für Temperaturverlauf in der 3. Phase - niedrigere Temperatur

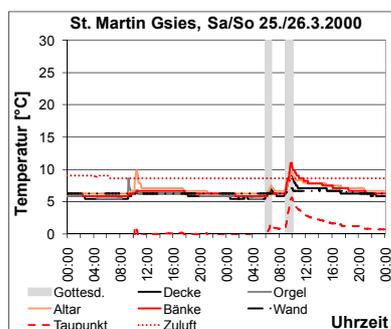


Abbildung C.48: Beispiel für Temperaturverlauf in der 4. Phase - keine Heizung

C.1.19 Pfarrkirche St. Martin in Gsies

Die Pfarrkirche zum hl. Martin in Gsies wird mit einer Luftheizung stationär (Thermostat im Altarraum) beheizt. 25°C warme Luft strömt durch die beiden Zuluftgitter vorne rechts und links vom Mittelgang in den Kirchenraum und verlässt diesen über das Abluftgitter gleich nach dem Haupteingang.

Die Raumklimamessung [Troi, 2001b] vom 3.2. bis 28.3.2000 erfolgte mit 13 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 3 an Oberflächen, 4 fürs Höhenprofil, je 1 für Orgel und Zuluft), davon 2 mit Feuchtigkeitssensor (Volksaltar, Zuluft).

Während der gesamten Messperiode war die Heizung vor allem nachts in Funktion. Schon ab etwa 10 Uhr stieg die Temperatur allein dank der durch die großen Fensterflächen herein strahlenden Sonne über die Mindesttemperatur.

Beim Heizen ist es unter der Decke am wärmsten, die Temperaturspreizung ist mit 2-3°C allerdings gering. Tagsüber, wenn die Heizung aussetzt, gleicht sich die Temperatur im Raum aus. Im Aufenthaltsbereich steigt sie dank der Sonnenstrahlung zum Teil sogar über die Temperatur unter der Decke.

Abbildungen C.45 bis C.48 zeigen 4 typische Situationen:

- Phase 1: Im Februar ist es so kalt, dass die Heizung läuft nachts zum Teil durchgehend, um die Temperatur bei 7.5°C zu halten (Beispiel Sa/So, 5./6. Februar).
- Phase 2: Während der Gebetstage am 4./5. März läuft die Heizung praktisch durch, um die am Thermostat erhöhte Soll-Temperatur von 9.5°C zu erreichen.
- Phase 3: Danach wurde der Thermostat wieder zurückgedreht - mit 6.5°C tiefer als im Februar. Deshalb, und dank der wärmeren Außenluft, schaltet die Heizung weniger oft ein; die im Februar beobachtete Temperaturschichtung ist noch existent, aber noch weniger ausgeprägt.
- Phase 4: Ende März wird es draußen so warm, dass die Heizung nicht mehr einschaltet (Sa/So, 25./26. März).

Die Wandtemperatur folgt der Lufttemperatur nur langsam; erst mit steigender Außentemperatur werden auch die Wände wärmer. Die von den Gottesdienstbesuchern eingebrachte Feuchte hebt den Taupunkt der Luft so weit an, dass es im Sockelbereich kurzfristig zu Kondensation kommen kann. Die relative Feuchtigkeit im Raum schwankt um 55% im Februar und 60% im März. Während der Heizimpulse sinkt die rel. Feuchtigkeit unter der Decke jeweils um knappe 10%.

C.1.20 Pfarrkirche St. Martin in Thurn

Die Kirche zu den hhl. Johannes d.T. und Martin, St. Martin in Thurn, wurde 1494 eingeweiht. Die gotische Kirche wurde später barockisiert, 1859 ein erstes Mal verlängert und 1884 von Joh. Rudifieria innen dekoriert. 1932 wurde die Kirche restauriert, 1966 wurde sie innen umgestaltet und u.a. die Warmluftheizung eingebaut. Da die Kirche für die wachsende Pfarrgemeinde zu klein wurde, wurde sie anschließend ein zweites Mal verlängert.

Die beiden Zuluftauslässe befinden sich rechts und links neben dem Volksaltar. Im hinteren Bereich der Kirche, vor dem letzten Bankblock, wird die Luft wieder abgezogen. Die Heizung hält eine Grundtemperatur von 5°C, für die Gottesdienste wird sie auf etwa 10°C erhöht (beginnend 1 bis 1.5 Stunden vor Gottesdienstbeginn). Die in den Raum eingeblasene Luft hat eine Temperatur von 22-28°C.

Die Raumklimamessung [Troi, 2000b] erfolgte vom 3.2. bis 10.5.2000 mit 19 Datenloggern (5 im Aufenthaltsbereich, 5 an Oberflächen, 6 für 2 Höhenprofile, je 1 für Orgel, Zuluft und außen), davon 3 mit Feuchtesensor (Orgel, Zuluft, außen).

Die Temperaturverteilung im Raum ist sowohl zwischen als auch während den Heizperioden sehr gleichmäßig: Oben und unten, vorne und hinten unterscheiden sich die Temperaturen selten um mehr als 4°C. Am wärmsten ist es tendenziell unter der Decke - aber die Differenz zwischen der Temperatur in 3 m und 10 m Höhe beträgt lediglich etwa 2°C, und das ist im Vergleich zu anderen Kirchen wenig. Wie üblich bei Kirchenheizungen steigt die Temperatur im Bankbereich erst mit Eintreffen der Gottesdienstbesucher, der Unterschied zum übrigen Kirchenraum hält sich dank Grundtemperierung jedoch in Grenzen.

Wegen der aufgrund eines Schadens bei Straßenbauarbeiten im Sommer 1999 durchnässten Kanäle, wurde die Zuluft stark befeuchtet (im Februar auf 30%, später sogar noch mehr). Um den Schaden in der Kirche in Grenzen zu halten, wurde auf der Orgelempore gleichzeitig die Luft entfeuchtet. So kommt es zu der in Abbildung C.50 erkennbaren konstanten relativen Feuchtigkeit im Bereich der Orgel. Dennoch ist die absolute Feuchtigkeit im Raum so hoch, dass der Taupunkt in kälteren Wandbereichen sehr oft unterschritten wird und es zur Kondensation kommt (die entsprechenden Schwärzungen zeichneten sich schon nach wenigen Monaten deutlich ab).

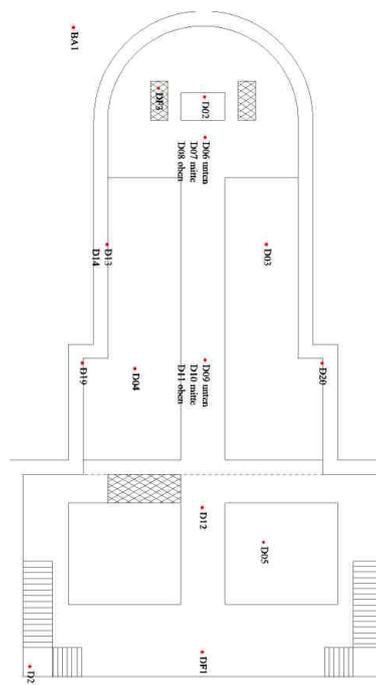


Abbildung C.49: Skizze des Grundrisses der zweimal verlängerten Kirche, mit Positionen der Zu- und Abluftgitter sowie der Sensoren

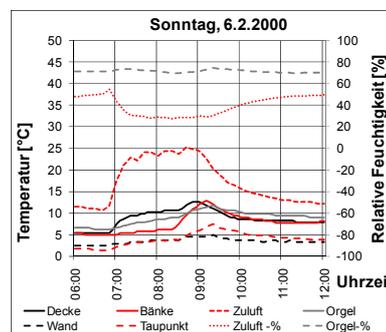


Abbildung C.50: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 6.2.2000, Gottesdienstbeginn um 8:30 Uhr

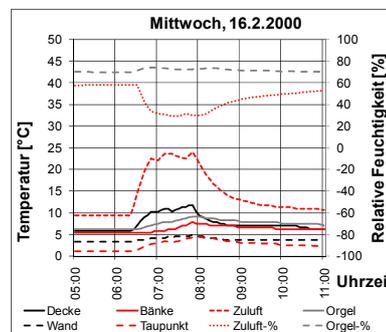


Abbildung C.51: Temperatur und Feuchtigkeit am Mittwoch, 16.2.2000, Gottesdienstbeginn um 7:30 Uhr

C.1.21 Pfarrkirche St. Pankraz

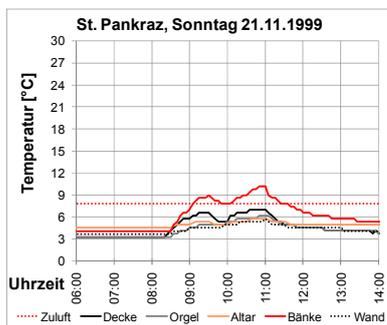


Abbildung C.52: Temperaturverlauf am Sonntag, 21.11.1999, Gottesdienste um 8:30 und 10:00 Uhr

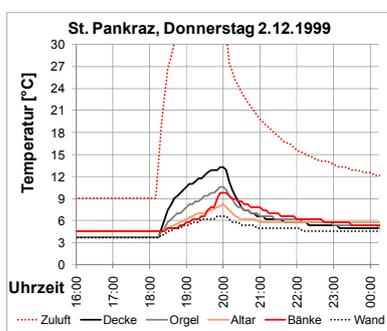


Abbildung C.53: Temperaturverlauf am Donnerstag, 2.12.1999, Rorate um 19:00 Uhr

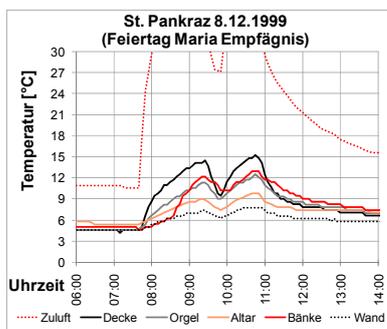


Abbildung C.54: Temperaturverlauf am Mittwoch, 8.12.1999 (Feiertag, Maria Empfängnis), Gottesdienste um 8:30 und 10:00 Uhr

Die Pfarrkirche zum hl. Pankraz wird mit einer Luftheizung temperiert: Die knapp 40°C warme Zuluft wird durch das Zuluftgitter in der Wand in den Raum eingeblasen und durch das im Boden eingelassene Abluftgitter wieder abgezogen. Die Kirche wird instationär beheizt - jeweils etwa eine halbe Stunde vor Beginn des Gottesdienstes und bis zu dessen Ende. Während der Adventszeit wird die Kirche jeden Abend für die Rorate-Gottesdienste geheizt, des Weiteren werden am Sonntag Vormittag zwei Gottesdienste gefeiert.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 17.11. bis 13.12.1999 mit insgesamt 24 Datenloggern (5 im Aufenthaltsbereich, 5 an Oberflächen, 2 oberflächennahe Temperaturen, 8 für 2 Höhenprofile, je 1 für Orgel, Zuluft, Dachraum und außen), davon 4 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, Zuluft, Dachraum, außen).

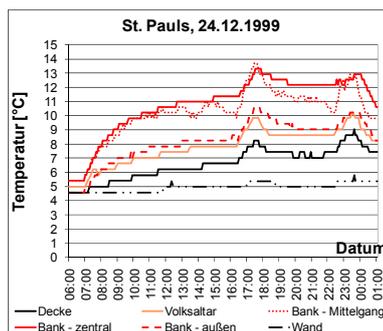
In der ersten Phase der Messung wurde die Kirche noch nicht beheizt. Die Temperatur in den Bänken steigt am Sonntag allein durch die Wärme der Gläubigen um 6 K auf 10°C. Die Temperatur unter der Decke steigt gleichzeitig um 3,5 K auf 7°C. Mit abnehmender Außentemperatur sinkt auch die Temperatur in der Kirche von anfangs 6°C auf 3°C. Am 25.11.1999 wird begonnen zu heizen - und durch das tägliche Heizen und die gleich bleibende Außentemperatur, sinkt die Temperatur im Kirchenraum nicht mehr unter 4°C.

Beim Heizen steigt die Temperatur im Kirchenraum rasch an: An Sonntagen hinten auf 14–16°C, vorne auf 13–15°C, beim Rorate etwa 2 K weniger. Die Verteilung im Kirchenschiff ist homogen (Δ im Höhenprofil nur 0,5–1 K). Bei der Orgel ist es 2 K kälter als unter Decke, am Volksaltar mit 9–10°C am kältesten. Bis zum Eintreffen der Gläubigen hinkt die Temperatur in den Bänken hinterher, um dann rasch zu steigen und mit 12–14°C ähnliche Werte wie im Kirchenschiff zu erreichen. Es bildet sich also nur kurz eine größere Temperaturdifferenz (4–6 K) zwischen den Bänken und unter der Decke heraus.

Die absolute Feuchtigkeit ist im Kirchenraum mit einer Schwankungsbreite von 4–5 g/m³ (mit Spitzen beim Heizen von 6–8 g/m³) innen deutlich höher als außen (2–5 g/m³). Ausgedrückt als Taupunkttemperatur bedeutet das für den Kirchenraum ungefährliche „Basiswerte“ zwischen -2 und 0°C - aber heizbedingte Spitzen von 4–6°C, wodurch an kalten Wandbereichen (Grundtemperatur 4°C) wiederholt kurzfristig Kondensation auftreten kann.

C.1.22 Pfarrkirche St. Pauls

Die Pfarrkirche zur Bekehrung des hl. Paulus in St. Pauls, aufgrund ihrer Größe auch „Dom auf dem Lande“ genannt, wird seit 1995 mit einer Bankheizung temperiert. Die elektrisch betriebenen Heizröhren (150W/m, insg. 33kW) sind unter den Kniebänken installiert und werden über eine Zeitschaltuhr (sowie einen Raumthermostat für minimale und maximale Lufttemperatur) gesteuert.



Die Raumklimamessung erfolgte vom 21.12.1999 bis 18.1.2000 mit 11 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 2 im Kirchenschiff, 1 in der Sakristei), davon jener am Altar mit Feuchtigkeitssensor.

Abbildung C.55: Temperaturverlauf am Sonntag, 21.11.1999, Gottesdienste um 8:30 und 10:00 Uhr

Im Messzeitraum war die Bankheizung während beinahe der Hälfte der Zeit (48%) in Betrieb; auf jeden Fall für die Gottesdienste, zum Teil von morgens bis abends, manchmal auch über mehrere Tagen in Folge ohne Unterbrechung.

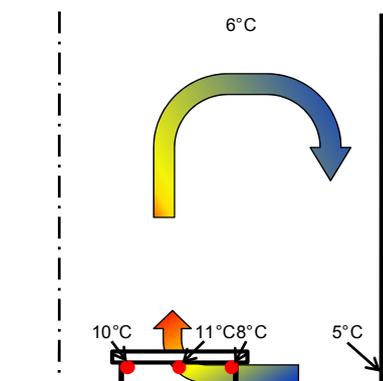


Abbildung C.56: Betrachtet man die Temperaturverteilung in den Bänken näher, legt die Tatsache, dass die Temperatur zum Mittelgang hin und in der Mitte der Bank ähnlich hoch, am äußeren Sensor aber gut 2-3 K (ähnlich wie am Volksaltar) niedriger ist, nahe, dass durch die über den Bänken aufsteigende warme Luft kältere von den Außenbereichen angesaugt wird, die Heizung also eine Luftwalze erzeugt

Bei solchen lang andauernden Heizereignissen steigen die Temperaturen nach etwa 4-5 Stunden nicht mehr weiter an, schon nach etwa 3 Stunden sind 70-80% der Temperaturdifferenz erreicht. Erst durch die Kirchenbesucher steigt die Temperatur im Bankbereich dann noch einmal kräftig an (siehe Abbildung C.55), denn deren „Heizleistung“ ist bei vollbesetzter Kirche jener der Bankheizung durchaus ebenbürtig.

Insgesamt steigt die Lufttemperatur beim Heizen im Kirchenschiff um etwa 2 K, beim Volksaltar um 3 K und in den Bänken um 5–6 K. Zwischen den Gottesdiensten sinkt die Lufttemperatur auf etwa 5°C, die Wandtemperatur schwankt im Messzeitraum zwischen 4 und 5°C. Kondensationsgefahr bestand - auch aufgrund der eher niedrigen absoluten Feuchte von 3–4 g/m³ - keine.

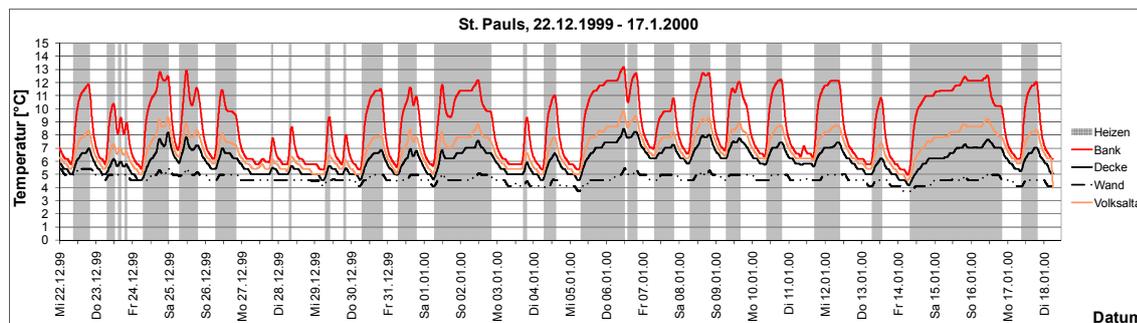


Abbildung C.57: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von St. Pauls (gleitender Mittelwert über 2 Stunden)

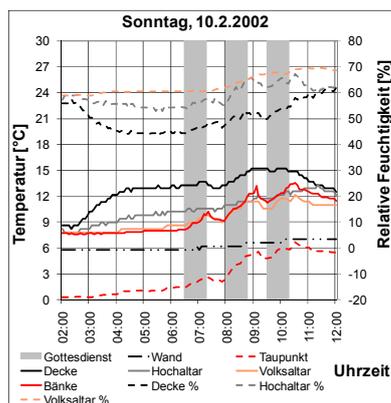


Abbildung C.58: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 10.2.2002, Gottesdienste um 6:30, 8:00 und 9:30 Uhr

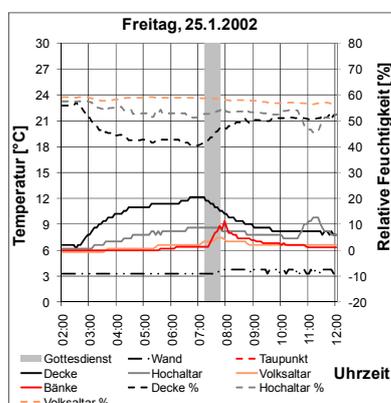


Abbildung C.59: Temperatur und Feuchtigkeit am Freitag, 25.1.2002, Gottesdienst um 7:15 Uhr

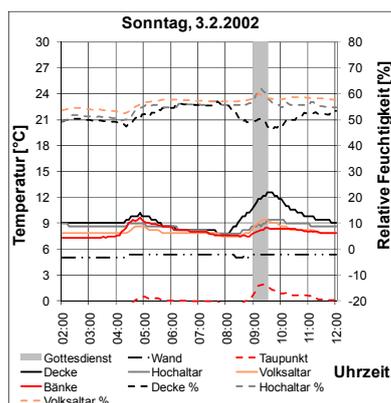


Abbildung C.60: Temperatur und Feuchtigkeit am Sonntag, 3.2.2002, Gottesdienst 18:30 Uhr

C.1.23 Pfarrkirche Sarntheim

Die Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Sarntheim wird mit einer Luftheizung temperiert: Die Luft wird im vorderen Mittelgang mit 45-50°C in den Raum eingeblasen. Die Heizung wird nicht durchgehend betrieben, sondern wird (i) morgens um 2:30 Uhr, also etwa 4-5 Stunden vor dem ersten Gottesdienst, eingeschaltet und läuft jeweils bis zum Ende des (letzten) Vormittagsgottesdienstes durch, ebenso wird sie (ii) für Gottesdienste am Nachmittag (Schülergottesdienst, Taufe, Begräbnis) und am Abend 30 Minuten vor Beginn der Liturgie aktiviert.

Die Raumklimamessung [Troi, 2002d] erfolgte vom 24.1. bis 20.2.2002 mit insgesamt 19 Datenloggern (5 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 6 für 2 Höhenprofile, je 1 für Hochaltar, Orgel, Zuluft und außen), davon 3 auch mit Feuchtigkeitssensor (Altar, Zuluft, außen).

Die Messungen zeigen, dass sich der Aufenthaltsbereich erst bei Anwesenheit der Gläubigen nennenswert erwärmt (siehe Abbildungen C.58, C.59 und C.60), und das, obwohl durchschnittlich an beinahe 6 Stunden pro Tag, also während 25% der gesamten Zeit, geheizt wird. Die wiederholten Heizimpulse verhindern, dass die Temperatur unter 6-8°C sinkt (siehe Abbildung 4.15). Aber ein solcher „Grundheizungseffekt“ könnte mit einigem Vorteil auch bei durchgehender Heizung mit kleinerer Leistung erreicht werden (siehe Abschnitt 4.5.2).

Zwischen den Heizzeiten verschwindet die Temperaturschichtung völlig, ein Einfluss der Sonne ist nicht beobachtbar. Die Wandtemperaturen liegen mit 3-6°C unter den Lufttemperaturen und reagieren auch deutlich weniger aufs Heizen (+2°C). Insbesondere im Sockelbereich des südlichen Seitenschiffs sind sie so niedrig, dass es durch die Feuchtigkeitzunahme während der Sonntagsgottesdienste (um 2g/m³) zu Kondensation kommen kann - die dort beobachteten Schäden sind also eher nicht auf Feuchtigkeit von außen zurückzuführen.

Die relative Feuchtigkeit schwankt im Messzeitraum zwischen 50% und 60%. Unter der Decke und an der Orgel sind während der Heizzeiten Einbrüche von jeweils etwa 10-15% zu verzeichnen. Am Hochaltar sinkt die relative Feuchte vor allem an Werktagen, wenn die steigende Temperatur nicht durch zusätzlichen Wasserdampf ausgeglichen wird. Am Volksaltar gleichen sich Temperaturzunahme und Wasserdampfeinbringung im Wesentlichen aus.

C.1.24 Pfarrkirche Schenna

Die neue¹ Pfarrkirche zur Gottesmutter Maria in Schenna hat eine Luftheizung, die die angrenzende alte Kirche mitheizen kann. 50–60°C warme Luft wird über das Zuluftgitter vorn im linken Seitenschiff eingeblasen und hinten im selben Seitenschiff wieder abgezogen. Die Heizung wird etwa 30 Minuten vor den Gottesdiensten aktiviert, zudem schaltet sie sich ein, wenn die Temperatur im Kirchenraum unter 5°C sinkt.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 17.1. bis 1.2.2000 mit 14 Datenloggern (4 im Aufenthaltsbereich, 2 an Oberflächen, 6 für 2 Höhenprofile, je 1 für die Zuluft und außen), davon 2 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, außen).

Während des Heizens bildet sich im ersten Moment ein gewisses Temperaturprofil über der Höhe des Raumes aus: Am schnellsten und stärksten steigt die Temperatur vorn (vor allem oben) - um gut 5–6 K in 30 Minuten -, dann folgt die Temperatur hinten im Raum (3–4 K in 30'), und schließlich die Temperatur im Aufenthaltsbereich (1–2 K). Mit Eintreffen der Gottesdienstbesucher vergleichmäßigte sich die Verteilung, denn nun steigt auch die Temperatur im Bankbereich um 4–6 K an, sodass die Temperatur im Raum nach einer weiteren halben Stunden von anfangs 6°C auf 10–12°C angestiegen ist - nur am Altar ist es mit 9°C etwas kälter, vorn unter der Decke mit 14°C etwas wärmer. Im Laufe des weiteren Gottesdienstes steigt die Temperatur dann noch um 1-2K weiter an.

Die Grundtemperierphasen sind von 10- bis 15-minütigen Heizereignissen mit bis zu 40°C warmer Zuluft geprägt, während derer die Temperatur vorn unter der Decke jeweils um 2–4 K ansteigt, im übrigen Luftvolumen etwas weniger und im Aufenthaltsbereich kaum. Bei niedriger Außentemperatur ist der Profilmesspunkt hinten unten der kälteste - abgesehen von den Oberflächentemperaturen.

Die Oberflächentemperaturen liegen in der Regel bei etwa 5°C, während der mehrtägigen Frostperiode sanken sie unter 3°C. Kondensationsrisiko konnte im Messzeitraum dennoch nicht festgestellt werden - was aber auch an der niedrigen abs. Feuchte lag (3.3 g/m³). Feuchteres Wetter würde zusammen mit dem Feuchteintrag beim Heizen von 1–2 g/m³ sehr wohl zu Feuchtheitproblemen an Wänden führen.

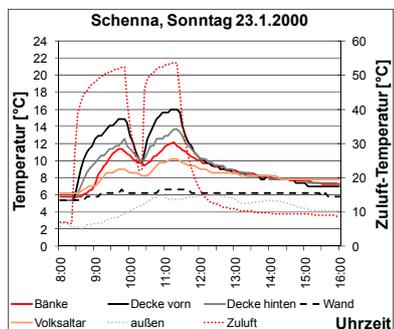


Abbildung C.61: Temperaturverlauf am Sonntag, 23.1.2000, Gottesdienste um 9:00 und 10:30 Uhr

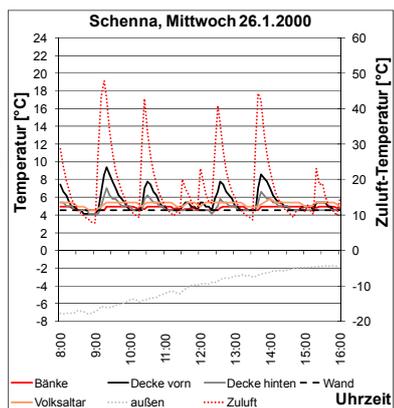


Abbildung C.62: Temperaturverlauf während des Grundtemperierens am Mittwoch, 26.1.2000

¹ 1914-1931 erbaut

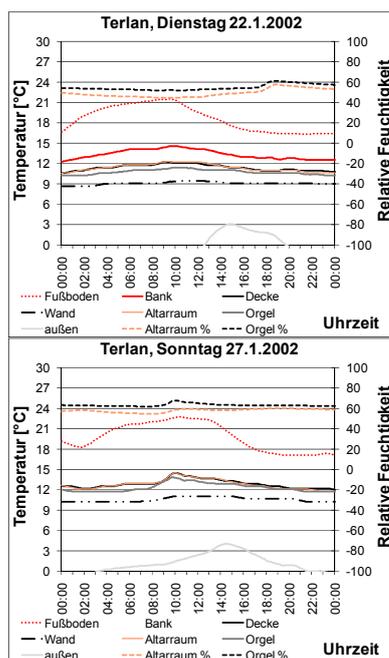


Abbildung C.63: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von Terlan - beispielhaft am Dienstag, 21.1.2002, und Sonntag, 26.2.2002, (ohne Temperatur im Bankbereich, da die Position des Datenlogger verändert worden war) dargestellt; deutlich erkennbar ist der Temperaturanstieg zum Gottesdienst um 20.00 Uhr; die relative Feuchtigkeit ist aufgrund der niedrigen abs. Feuchte besonders niedrig

C.1.25 Pfarrkirche Terlan

Die Pfarrkirche Mariä Himmelfahrt in Terlan wird mit einer Fußbodenheizung temperiert. 2001 wurde - im Rahmen einer Restaurierung, die auch ein (Wieder-)Tiefersetzen des Bodens umfasste, - die in den 1960er Jahren eingebaute Anlage erneuert und u.a. rundum entlang der Außenwände eine Belüftung ermöglicht. Die Kirche wird regelmäßig für Gottesdienste genutzt - und über den gesamten Tag viel besucht, wie bei der Montage der Datenlogger auffiel.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 21.1.2002 bis 18.2.2002 mit 20 Datenloggern (5 im Aufenthaltsbereich, 5 an Wandoberflächen, 2 am Fußboden, 6 für 2 Höhenprofile, je 1 für die Orgel und außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, Orgel, außen).

Die Außentemperatur liegt im Januar um 0°C, im Februar steigt sie auf 4-5°C an. Im Innenraum schwankt die Temperatur anfangs zwischen 11°C und 12°C, um im Februar auf 13-14°C anzusteigen. Abgesehen von der in den Bänken selbst gemessenen Temperatur (die etwa 1.5-2 K über den anderen Temperaturen liegt) und einer etwas niedrigeren Temperatur bei der Orgel auf der Empore (1 K) ist die Temperaturverteilung im Raum sehr einheitlich. Die Oberflächentemperatur des Fußbodens schwankt zwischen 16°C und 22°C: In der Regel wurde die Anlage nachts mit höherer Temperatur gefahren als tagsüber. Während der Gottesdienste am Wochenende steigt die Temperatur, durch die Heizleistung der Kirchenbesucher, nochmals um 1.5-2 K an

Die Wand im Sockelbereich der Seitenkapelle ist mit 9-11°C die kälteste Messstelle, die übrigen Wandmessstellen (auch in größerer Höhe) folgen deutlich der Lufttemperatur. Kondensation ist trotz der recht hohen absoluten Feuchtigkeit im Raum (6.4 g/m^3) kein Problem. Der Vergleich mit der Außenfeuchte (5 g/m^3), sowie die Tatsache, dass die gemessene abs. Feuchtigkeit bei der Orgel höher ist als im Altarraum (um 0.25 g/m^3) legt nahe, dass über die Heizperiode kontinuierlich Feuchtigkeit desorbiert wird. Die relative Feuchtigkeit schwankt bei der Orgel zwischen 60% und 70%, im Altarraum zwischen 50% und 60%. Durch den Feuchtigkeitsanstieg von $1-2 \text{ g/m}^3$ steigt die relative Feuchtigkeit während der Gottesdienste jeweils um 5-10% an.

C.1.26 Pfarrkirche Tschengels

Die Pfarrkirche Mariä Geburt in Tschengels wird über eine Fußbodenheizung beheizt, die die Energie zur Gänze aus dem - im Winter ungenutzten - Bewässerungsgraben bezieht, der durch das Dorf fließt: Eine Wärmepumpe nutzt das 2-3°C kalte Wasser als Niedertemperatur-Wärmequelle für den Verdampfer; die elektrische Energie für den Kompressor der Wärmepumpe wird von einem kleinen mit Wasserkraft angetriebenen Generator geliefert. Die gewonnene Wärme wird für die Beheizung der Kirche und des Pfarrhauses verwendet.

Die Raumklimamessung erfolgte vom 26.2 bis 25.3.2001 mit 12 Datenloggern (3 im Aufenthaltsbereich, 3 an Oberflächen, 3 fürs Höhenprofil, je 1 für Orgel und außen), davon 2 mit Feuchtigkeitssensor (Altar, außen). Die Kirche wird täglich für einen, am Sonntag für zwei Gottesdienste verwendet. Zudem fanden im Messzeitraum vom 26.2.2001 bis 25.3.2001 dreimal wöchentlich Kreuzwegandachten statt.

Typisch für eine Kirche mit Fußbodenheizung ist die Temperatur im Aufenthaltsbereich höher als unter der Decke: Zu Beginn des Messzeitraumes (Ende Februar 2001) - bei Außentemperaturen zwischen 1 und 2°C - herrschen in den Bänken 15°C, im Altarraum 13°C und unter der Decke 10°C. Die Oberflächen haben eine Temperatur von 8 bis 9°C.

Diese - für Südtiroler Verhältnisse - hohen Temperaturen wirken sich aber ungünstig auf die relative Feuchtigkeit aus: Diese liegt im gesamten Messzeitraum mit 30% bis 40% (40% bis 50% unter der Decke) sehr niedrig. Eine Regelung, die die Temperatur bei allzu sehr sinkender relativer Feuchtigkeit beschränkt, wäre dringend anzuraten. Mit im Mittel 5 g/m³ (Tagesmittel zwischen 2.9 g/m³ und 6.3 g/m³ schwankend) ist die absolute Feuchtigkeit im Kirchenraum nämlich vergleichsweise hoch und kann bei etwas niedrigerer Raumlufttemperatur sehr wohl höhere Werte der relativen Feuchtigkeit garantieren. Umgekehrt betrachtet würde es bedeuten, dass bei niedrigerer absoluter Luftfeuchtigkeit (die gemessenen Außenklimawerte von im Mittel 5.7 g/m³ sind im Vergleich zu anderen Messungen eher hoch) die relative Luftfeuchte im Raum sogar auf noch tiefere Werte sinkt.

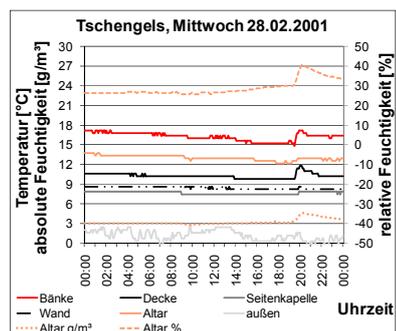


Abbildung C.64: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von Tschengels - beispielhaft am 28.2.2001 dargestellt; deutlich erkennbar ist der Temperaturanstieg zum Gottesdienst um 20.00 Uhr, die relative Feuchtigkeit ist aufgrund der niedrigen abs. Feuchte besonders niedrig

C.1.27 Pfarrkirche Vals

Die Pfarrkirche zum hl. Apostel Andreas in Vals verfügt über eine elektrische Bankheizung, die jeweils 20 Minuten vor Gottesdienstbeginn eingeschaltet und noch vor Ende des Gottesdienstes wieder ausgeschaltet wird. Im Bereich des Volksaltars, bei den Kinderbänken und auf der Orgelempore übernehmen Heizmatten die Temperierung.

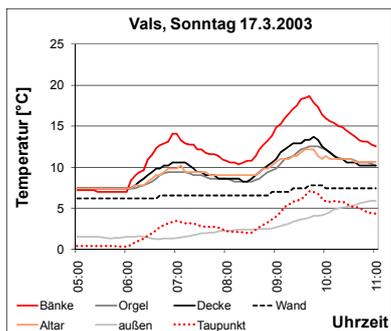


Abbildung C.65: Temperaturverlauf in der Pfarrkirche von Vals, beispielhaft dargestellt am Sonntag, den 17.3.2002
 Am stärksten steigt die Temperatur in den Bänken (5–6 K an Werktagen, 7 K beim gut besuchten 9-Uhr-Gottesdienst am Sonntag), weniger im Altarbereich (2–3 K, resp. 4–5 K) und auf der Orgelempore überhaupt nur an Sonntagen. An den Profilmessstellen steigt die Temperatur um etwa 2–3 K (an Sonntagen etwa 5 K). Von einem Temperaturprofil zu sprechen ist allerdings beinahe übertrieben: Die einzelnen Profilmessstellen weichen selten mehr als 1 K voneinander ab. Die Oberflächentemperatur im Sockelbereich der Nordwand reagiert auf die Heizperioden praktisch gar nicht.

Die Raumklimamessung [Troi, 2000e] erfolgte vom 13.3. bis 9.4.2002 mit insgesamt 22 Datenloggern (6 im Aufenthaltsbereich, 6 an Oberflächen, 7 für 2 Höhenprofile, je 1 bei Hochaltar, Orgel und außen), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Ambo, Orgel, außen). Ziel der Untersuchung war es zum einen, Ist-Zustand und Charakteristika der Kirche als Entscheidungsgrundlage für eine neue Kirchenheizung zu ermitteln, zum anderen eine Verbindung des Pilzbefalls im Bankspiegel mit dem derzeitigen Heizungssystem zu prüfen.

Die Temperaturverteilung im Kirchenraum (Abbildung C.65) ist typisch für Bankheizungen: Am stärksten steigt die Temperatur in den Bänken, weniger im Höhenprofil und parktisch gar nicht im Sockelbereich der Wände.

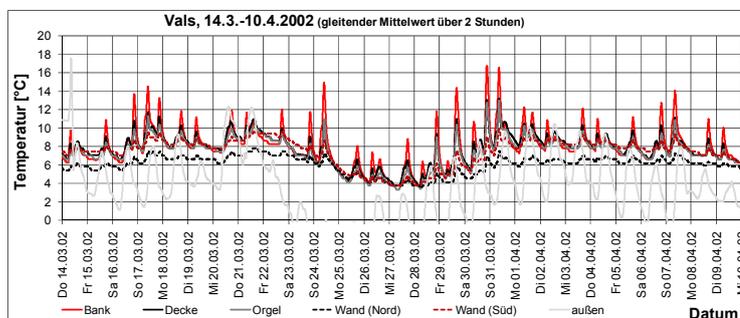


Abbildung C.66: Temperaturverteilung während der Messperiode (gleitendes 2h-Mittel): Gut erkennbar sind die Temperaturspitzen im Bankbereich während des Heizens (durch gleitenden Mittelwert 1-2K gedämpft), aber auch im Kirchenschiff steigt die Temperatur beim Heizen.
 Zwischen den Heizzeiten liegt die Temperatur der Luft zwischen den Temperaturen der Nordwand und Südwand. Mit dem deutliche Temperaturabfall außen am 22. März sinkt die Lufttemperatur in der Kirche - aber nicht unter die Temperatur der Nordwand. Erst wenn die Südwand so viel gespeicherte Wärme abgegeben hat, dass sie nur mehr geringfügig wärmer als die Nordwand ist, sinkt auch die Temperatur der letzteren - jetzt geben beide Mauern gespeicherte Wärme ab. Mit dem besseren Wetter und dank der Sonneneinstrahlung steigt am Ende der Woche die Temperatur der Südwand wieder über jene der Nordwand.

Die thermische Trägheit der Kirche bei einem Wetterumschwung zeigt Abbildung C.66. Dem Temperatursprung von 11°C außen (von 8.8°C auf -2°C in 3 Tagen) steht mit 4°C ein wesentlich geringerer in der Kirche gegenüber. Diese Trägheit der Kirche paart sich gut mit der angedachten Fußbodenheizung.

Sowohl die relative als auch die absolute Luftfeuchtigkeit während des Messzeitraumes lassen keine gravierenden Probleme erwarten: Weder ist die Kondensationsgefahr so groß, dass es zu starker Verschmutzung der Oberflächen kommen könnte, noch belasten starke Schwankungen die Holzeinrichtung (die relative Feuchtigkeit bewegt sich zwischen 50% und 60%). Allerdings zeigen die Messungen in Vals, dass die Temperaturschwankungen im Bankbereich zu einiger „Feuchtigkeitsbewegung“ führen (siehe Abbildung C.67):

Während des sonntäglichen 6-Uhr-Gottesdienstes (vergleichbar mit Werktagen) steigt die relative Feuchtigkeit mit Einschalten der Heizung bei der Orgel und am Ambo, während sie im Bankbereich sinkt: Dort steigt die Temperatur heizungsbedingt stark an und das Holz der Bänke und des Bankspiegels versucht dem entsprechenden Abfall der relativen Feuchtigkeit entgegen zu wirken, indem es Wasser abgibt - die absolute Feuchtigkeit steigt an (um etwa 1g/m^3). Da sich Wasserdampf sehr schnell gleichmäßig im ganzen Raum verteilt und die Temperatur im übrigen Raum weniger stark ansteigt, nimmt im gesamten Kirchenraum auch die relative Feuchtigkeit zu. Dass beim 9-Uhr-Gottesdienst deutlich mehr Gläubige in der Kirche sind, schlägt sich auch im Feuchtigkeitsverlauf nieder: Die relative Feuchtigkeit im Bankbereich sinkt anfangs zwar auch, aber nur so lange, bis der von den Kirchgängern zusätzlich abgegebene Wasserdampf ausgleichend wirkt.

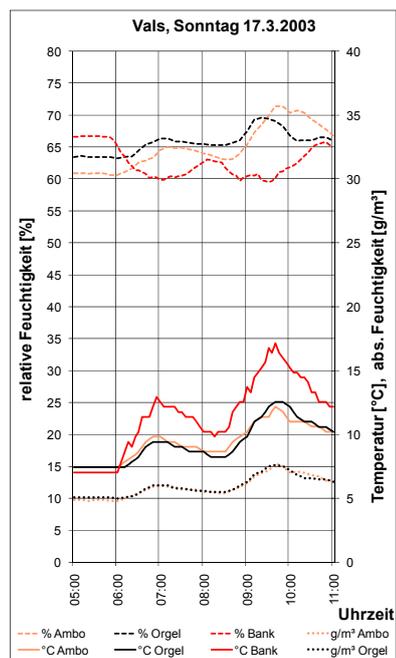


Abbildung C.67: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf im Bankbereich

Dass sich in Folge dieser Feuchtigkeitszyklen im Luftraum zwischen Holz und Boden ein recht feuchtes Mikroklima entwickelt, ist wohl denkbar und passt auch zur von Arendt [1976b] beschriebenen „Vermorschung“ der Bretter und Bohlen des Bankspiegels bei Bankheizung. Ein solches feuchtes Klima kann bei den in Kirchen herrschenden Temperaturen einer Reihe von Pilzen akzeptable Lebensbedingungen bieten, und damit Ursache des beobachteten Pilzbefalls im Bankspiegel sein.

Allerdings kann die Feuchtigkeit auch andere Quellen haben: Die im Altarraum am Boden beobachteten periodisch auftretenden Feuchteflecken lassen sich aus den Messergebnissen nicht mit Kondensation erklären, sondern müssen anderen Ursprungs sein. Für das Vorhandensein einer externen Feuchtigkeitsquelle spricht auch, dass der Mittelwert der absoluten Feuchtigkeit in der Kirche mit 4.5g/m^3 deutlich über dem Mittelwert der Außenfeuchte von 3.7g/m^3 liegt. Dass das „Anzapfen“ dieser Quelle durch die Bankheizung beschleunigt wird, ist dennoch denkbar.

C.1.28 Pfarrkirche Vilpian

Die Pfarrkirche zum hl. Josef in Vilpian (erbaut 1949-1954) wird zur Zeit der Raumklimamessung mit 50-55°C warmer Luft geheizt, die in etwa 4 m Höhe an der Südwand des Altarraums eingeblasen und vor dem Altar in der Seitenkapelle abgezogen wird. Die Heizung wird jeweils vor den Gottesdiensten eingeschaltet (45' an Sonntagen, 30' beim Rorate, 15' bei Schülertagesdiensten).

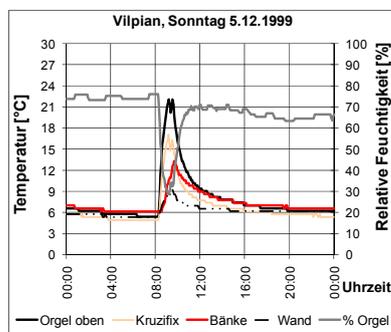


Abbildung C.68: Temperaturverlauf am Sonntag, den 15.12.1999, in der Pfarrkirche von Vilpian.

Die relativ weit oben in den Raum einströmende warme Heizungsluft sammelt sich zuerst im oberen Teil der Kirche und verteilt sich von dort langsam auf den Raum. Der Aufenthaltsbereich wird zu einem beträchtlichen Teil von den Kirchgängern selbst erwärmt.

Die Raumklimamessung [Troi, 2000c] erfolgte vom 29.11. bis 20.12.1999 mit 24 Datenloggern (9 im Aufenthaltsbereich, 4 an Oberflächen, 10 für 4 Höhenprofile, 1 Zuluft), davon 3 mit Feuchtigkeitssensor (Seitenaltar, Tabernakel, Zuluft).

Mit einem gemessenen Temperaturunterschied von 10-12°C zwischen Bankbereich (8-10°C) und Messstelle auf der Orgelempore (18-24°C) - die sich noch nicht einmal ganz unter der Decke befindet! - ist die Temperaturverteilung in Vilpian nicht nur aus energetischer, sondern auch aus denkmalpflegerischer Sicht denkbar ungünstig.

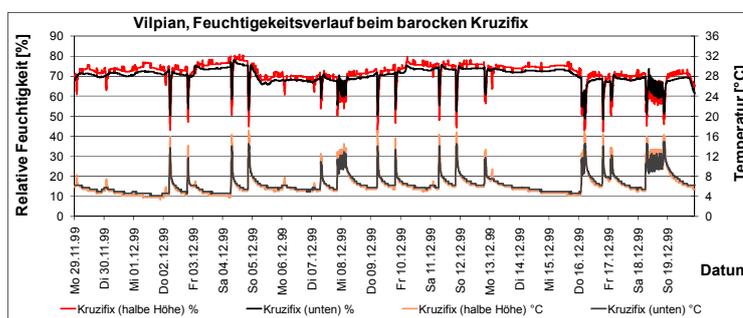


Abbildung C.69: Heizungsbedingte Einbrüche der relativen Feuchtigkeit am Kruzifix: ein Sensor auf halber Höhe, der andere am unteren Ende beim Tabernakel.

Die Temperaturspitzen verursachen nämlich große Einbrüche der rel. Feuchte - um teilweise über 25% im Bereich des Kruzifixes. Erschwerend kommt hinzu, dass sich Temperatur und Feuchte über der Höhe des Kruzifixes stark verändern (siehe Abbildung C.69), was zu Spannungen im Objekt führen kann.

Dabei steigt die abs. Feuchte während des Heizens durchaus an (1-2 /m³). Als Feuchtequellen kommen Kirchenbesucher in Betracht, aber auch Zuluftkanäle und Desorption aus der Einrichtung (während einer längeren Heizperiode entsprechen den Temperaturanstiegen der einzelnen Heizimpulse jeweils auch Anstiege der abs. Feuchte - um etwa 1 g/m³). Zusammen mit der niedrigen Oberflächentemperatur bedeutet dies ein nicht unbeträchtliches Kondensationsrisiko für die Kirche.

C.2 Vollständige Kennwerttabelle

	Bozen	Gais ¹	Gais ²	Pufels	St.Martin in Gsies	St.Martin in Thurn ³	St.Martin in Thurn ⁴
	LH-G	LH-G	LH-G	LH-G	LH-S	LH-G	LH-G
Zuluft							
1 Kleinstes Zuluftmaximum	23.24	11.38	15.62	7.03	18.28	12.55	11.38
2 Größtes Zuluftmaximum	54.74	28.70	28.31	40.13	26.73	29.90	27.52
3 MW der Zuluftmaxima	48.60	17.20	20.16	21.16	24.35	23.94	21.67
Absolute Feuchtigkeit							
4 außen - Min abs. Feuchte (Messwerte)	1.00	-	-	0.80	1.10	1.30	1.50
5 außen - Max abs. Feuchte (Messwerte)	7.00	-	-	4.30	6.50	4.60	5.90
6 außen - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	3.37	-	-	2.36	3.12	3.08	3.67
7 außen - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	1.61	-	-	1.08	1.33	1.88	2.00
8 außen - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	6.38	-	-	3.69	4.89	3.99	5.18
9 außen - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	3.35	-	-	2.37	3.13	3.07	3.64
10 innen - Min abs. Feuchte (Messwerte)	3.40	-	3.70	3.90	2.60	-	-
11 innen - Max abs. Feuchte (Messwerte)	5.80	-	7.30	8.20	7.00	-	-
12 innen - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	4.44	-	4.66	4.94	4.53	-	-
13 innen - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	3.55	-	3.94	4.55	3.83	-	-
14 innen - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	5.30	-	5.67	5.51	5.15	-	-
15 innen - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	4.44	-	4.56	4.93	4.53	-	-
16 Orgel - Min abs. Feuchte (Messwerte)	-	4.80	3.90	-	3.10	4.20	4.50
17 Orgel - Max abs. Feuchte (Messwerte)	-	8.00	7.00	-	5.90	8.30	8.30
18 Orgel - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	-	5.76	4.77	-	4.43	5.38	5.69
19 Orgel - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	5.05	4.09	-	3.59	4.67	5.25
20 Orgel - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	6.50	5.73	-	5.51	6.08	6.25
21 Orgel - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	5.74	4.67	-	4.43	5.38	5.68
Kondensation							
22 Kondensation (Anteil Zeit in %)	0.00	0.00	0.00	50.21	0.01	16.17	6.14
23 Taupunktastand < 1 (Anteil Zeit in %)	0.00	0.95	0.00	96.86	0.06	46.50	23.21
Relative Feuchtigkeit							
24 Altarraum - MW RH	37.84	-	58.00	81.14	56.21	69.90	70.78
25 Altarraum - MW ΔRH (Heizen)	1.06	-	8.34	0.02	0.21	0.15	-0.24
26 Altarraum - MW RHMinima (Heizen)	37.11	-	53.48	81.33	55.21	69.15	71.41
27 Altarraum - MW ΔRH (TagesMW)	14.60	-	3.34	2.49	2.62	4.13	1.52
28 Altarraum - Max ΔRH (TagesMW)	14.60	-	16.07	4.71	8.56	4.31	7.73
29 Altarraum - Anzahl der Schwankungen	5.00	-	2.00	4.00	8.00	3.00	5.00
30 Altarraum - MW RHMinima (TagesMW)	34.95	-	50.77	79.97	55.22	68.89	69.54
31 Altarraum - Min RHMinima ((TagesMW)	31.56	-	50.74	77.98	48.71	67.71	65.63
32 Orgel - MW RH	36.01	70.83	57.57	81.13	55.54	69.40	70.27
33 Orgel - MW ΔRH beim Heizen	3.00	3.92	5.12	0.17	1.15	-0.01	-0.57
34 Orgel - MW RHMinima beim Heizen	33.37	67.46	55.60	81.24	55.81	69.26	71.17
35 Orgel - MW ΔRH (TagesMW)	13.84	2.55	3.54	2.79	38.23	3.11	6.00
36 Orgel - Max ΔRH (TagesMW)	13.84	16.93	16.69	5.64	38.23	3.62	7.98
37 Orgel - Anzahl der Schwankungen	5.00	3.00	2.00	2.00	8.00	3.00	4.00
38 Orgel - MW RHMinima (TagesMW)	33.24	68.86	49.85	77.77	50.84	68.55	68.54
39 Orgel - Min RHMinima (TagesMW)	29.96	59.95	49.18	77.76	24.23	67.53	65.06
40 Decke - MW RH	36.62	65.79	56.64	-	55.46	68.13	69.22
41 Decke - MW ΔRH beim Heizen	7.97	18.52	10.71	-	6.77	11.82	8.58
42 Decke - MW RHMinima beim Heizen	28.67	47.29	48.26	-	49.43	56.69	60.94
43 Decke - MW ΔRH (TagesMW)	14.33	4.31	13.54	-	1.73	2.52	6.50
44 Decke - Max ΔRH (TagesMW)	14.33	16.79	13.54	-	9.89	6.05	9.18
45 Decke - Anzahl der Schwankungen	5.00	5.00	2.00	-	9.00	3.00	4.00
46 Decke - MW RHMinima (TagesMW)	33.71	61.83	53.25	-	53.81	66.54	67.56
47 Decke - Min RHMinima (TagesMW)	30.52	50.97	50.86	-	48.39	63.64	63.45
Maximum aus 25, 33 und 41 Max aus 25, 33 und 41	7.97	18.52	10.71	0.17	6.77	11.82	8.58
Minimum aus 26, 34 und 42 Min aus 26, 34 und 42	28.67	47.29	48.26	81.24	49.43	56.69	60.94

Tabelle C.1: Kennwerte 1-47 für Luftheizung mit Grundtemperierung (LH-G) und instationär betriebene (LH-I). In einigen Fällen wurden einzelne Zeitabschnitte ausgewertet: ¹ 10.11.-7.12.2001, ² 8.12.-21.12.2001, ³ 3.2.-1.3.2000, ⁴ 1.3.-29.3.2000.

	Schenna	Branzoll	Dom Brixen	Karneid	Laag	Prad	St.Pankraz	Sarnthein	Tirol	Vilpian
	LH-G	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I
1	12.93	53.53	12.55	18.66	9.82	9.42	11.77	32.76	18.28	39.67
2	59.90	62.01	34.01	25.56	44.89	21.71	43.42	53.53	34.43	56.60
3	40.15	57.37	28.16	23.76	39.00	15.00	37.74	46.03	30.97	49.52
4	0.90	1.50	0.00	-	1.10	1.10	1.40	-	1.10	-
5	6.70	6.30	2.50	-	5.30	8.40	7.10	-	7.90	-
6	2.57	3.23	0.30	-	2.85	2.73	3.38	-	4.79	-
7	1.38	1.91	0.00	-	1.98	1.62	1.95	-	1.43	-
8	5.72	4.99	1.54	-	3.82	3.56	4.95	-	6.79	-
9	2.46	3.26	0.29	-	2.76	2.66	3.35	-	4.81	-
10	2.00	2.20	4.20	-	2.70	2.60	3.90	0.00	3.30	4.50
11	5.50	6.70	7.70	-	5.60	8.70	7.80	7.40	9.60	7.20
12	3.37	3.70	6.27	-	3.52	3.38	4.75	4.58	6.72	5.26
13	2.54	2.66	5.27	-	2.80	2.85	4.26	0.15	3.52	4.74
14	4.50	4.35	6.83	-	4.35	3.75	5.59	5.82	8.56	6.02
15	3.32	3.71	6.29	-	3.50	3.34	4.73	4.59	6.73	5.27
16	0.00	2.40	4.70	-	-	-	-	-	3.60	4.40
17	0.00	6.60	7.70	-	-	-	-	-	10.60	7.10
18	0.00	3.74	6.07	-	-	-	-	-	6.95	5.27
19	0.00	2.80	5.24	-	-	-	-	-	3.83	4.70
20	0.00	4.44	6.55	-	-	-	-	-	8.85	5.99
21	0.00	3.76	6.09	-	-	-	-	-	6.96	5.28
22	0.00	1.33	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00
23	0.00	2.66	0.19	-	0.00	0.00	0.00	3.62	1.31	0.02
24	45.85	53.76	63.61	-	49.52	47.35	67.97	55.85	68.16	70.26
25	-0.01	0.20	1.68	-	3.72	3.99	0.30	0.09	0.69	4.19
26	42.51	51.46	60.79	-	46.54	43.93	68.23	58.19	65.84	60.96
27	25.03	4.90	15.20	-	10.36	8.35	13.65	61.46	4.90	7.10
28	25.03	23.07	15.20	-	16.13	11.32	13.65	61.46	27.50	7.10
29	2.00	3.00	5.00	-	2.00	4.00	3.00	5.00	5.00	3.00
30	38.34	46.70	61.48	-	44.47	43.53	63.57	44.78	62.59	67.97
31	34.93	36.48	51.61	-	40.11	39.83	58.91	1.86	42.15	65.92
32	0.00	52.99	60.21	-	47.37	47.72	69.16	50.23	72.27	66.94
33	0.00	7.49	7.41	-	20.86	8.65	7.98	2.57	3.44	17.27
34	0.00	42.90	50.94	-	27.82	39.94	60.93	47.05	67.68	38.66
35	0.00	2.13	14.08	-	7.62	9.76	11.70	57.03	4.73	8.23
36	0.00	22.43	14.08	-	13.05	12.14	11.70	57.03	22.87	9.06
37	0.00	4.00	5.00	-	2.00	3.00	3.00	6.00	5.00	3.00
38	0.00	49.33	57.88	-	43.40	42.55	65.56	41.86	67.87	64.04
39	0.00	36.94	49.15	-	38.65	39.86	60.12	1.65	48.50	61.96
40	44.02	50.97	58.15	-	45.86	45.75	67.96	48.01	66.22	69.36
41	5.63	19.72	5.50	-	24.31	13.33	17.30	3.85	14.42	9.51
42	36.36	28.42	42.98	-	22.20	32.15	50.23	41.89	51.14	52.03
43	24.06	1.31	14.55	-	8.34	10.02	12.03	54.07	4.15	9.24
44	24.06	21.86	14.55	-	13.15	14.06	12.03	54.07	18.39	9.24
45	2.00	4.00	5.00	-	2.00	3.00	4.00	6.00	5.00	4.00
46	37.51	47.48	55.72	-	41.82	39.94	65.35	40.18	61.99	67.37
47	35.13	35.50	46.65	-	37.34	37.79	59.12	1.61	45.37	63.65
	5.63	19.72	7.41	-	24.31	13.33	17.30	3.85	14.42	17.27
	36.36	28.42	42.98	-	22.20	32.15	50.23	41.89	51.14	38.66

	Bozen	Gais ¹	Gais ²	Pufels	St.Martin in Gsies	St.Martin in Thurn ³	St.Martin in Thurn ⁴
	LH-G	LH-G	LH-G	LH-G	LH-S	LH-G	LH-G
Wand-Luft-Differenzen							
48 Min Δ (Luft-Wand)	-0.90	-0.20	0.47	-2.22	-1.78	1.60	0.74
49 Δ (Luft-Außen) bei diesem Minimum	8.23	6.01	11.62	5.59	9.97	16.38	3.18
50 Max Δ (Luft-Wand)	5.15	7.21	6.84	10.04	4.43	7.34	6.77
51 Δ (Luft-Außen) bei diesem Maximum	7.08	14.23	14.86	28.10	16.81	16.25	16.22
52 MW Δ (Luft-Wand)	0.78	1.46	2.79	1.61	1.01	3.03	1.98
53 MW Δ (Luft-Außen)	7.32	8.05	13.65	7.71	7.98	9.10	5.72
54 MW Δ (Luft-Wand) (Heizzeit)	2.07	3.01	3.15	4.37	1.39	4.93	3.92
55 MW Wandtemperatur	12.79	6.59	5.62	1.39	5.92	3.50	5.21
56 MW Lufttemperatur	13.57	8.05	8.41	3.00	6.93	6.53	7.19
57 MW Außentemperatur	6.26	-	-5.23	-4.71	-1.05	-2.57	1.47
58 MW Wandtemperatur (Heizzeit)	13.10	6.62	5.57	2.77	6.17	4.05	5.14
59 MW Lufttemperatur (Heizzeit)	15.17	9.62	8.72	7.14	7.56	8.99	9.05
60 Mittlere Maxima Δ (Luft-Wand) (Heizzeit)	3.85	5.93	5.44	5.36	1.89	5.93	4.88
84-56 84-56	1.13	2.61	2.10	5.46	-0.56	4.57	3.71
Gleichmäßigkeit							
61 MW Temperatur unter der Decke	13.84	8.21	8.23	2.74	6.89	6.87	7.43
62 MW Temperatur bei der Orgel oben	13.47	7.73	8.05	3.10	7.52	6.96	7.66
63 MW Δ Profil (oben-unten)	0.15	0.22	-0.17	-0.58	0.02	0.74	0.59
64 MW Δ Orgel (oben-unten)	-	-0.32	-0.64	-	-	0.46	0.55
65 MW Δ Decke (vorn-hinten)	0.49	-0.35	0.99	-0.71	-0.72	-0.15	-0.12
66 MW Δ Aufenthaltsbereich (vorn-hinten) Heizzeit	0.61	0.34	0.48	-0.11	0.57	-0.39	-0.25
67 MW Δ LuftAufenthaltsbereich	0.49	0.68	1.46	-0.62	0.03	1.08	0.83
68 MW Δ Profil (oben-unten) Heizzeit	0.41	0.75	-0.30	-2.29	0.79	1.28	1.19
69 MW Δ Orgel (oben-unten) Heizzeit	-	-0.59	-0.69	-	-	1.05	0.98
70 MW Δ Decke (vorn-hinten) Heizzeit	0.26	-0.96	1.39	3.35	0.44	0.76	0.65
71 MW Δ Aufenthaltsbereich (vorn-hinten) Heizzeit	0.56	0.40	0.49	0.39	0.81	-0.40	-0.21
72 MW Δ (Luft-Aufenthaltsbereich) Heizzeit	1.84	2.63	1.85	0.86	1.10	3.80	3.25
73 MW der Maxima (je Heizzeit) von 63	1.03	1.55	0.82	-0.50	1.35	1.65	1.53
74 MW der Maxima (je Heizzeit) von 64	-	-0.16	-0.28	-	-	1.70	1.45
75 MW der Maxima (je Heizzeit) von 65	0.79	-0.23	3.38	5.36	0.76	1.22	1.00
76 MW der Maxima (je Heizzeit) von 66	0.93	0.95	1.08	0.90	1.02	0.03	0.24
77 MW der Maxima (je Heizzeit) von 67	3.98	6.43	4.13	1.88	1.63	4.85	4.19
Sonntagsgottesdienste (MW über Gottesdienst)							
78 Min Aufenthaltsbereich (kälteste Messstelle)	13.67	8.39	8.83	6.33	6.39	7.76	8.37
79 Max Aufenthaltsbereich (wärmste Messstelle)	14.93	9.36	11.04	7.48	7.96	10.12	9.95
80 MW im Aufenthaltsbereich	14.42	8.81	10.17	6.91	6.98	8.88	9.15
81 Orgelepore	14.15	10.09	12.14	4.96	6.07	8.95	9.54
82 Δ im Aufent. während Gottesdienst	1.36	1.38	0.13	4.69	1.92	3.34	2.66
83 MW Lufttemperatur über alle Messstellen	14.70	10.67	10.51	8.45	6.36	11.10	10.90
84 Δ Luft während Gottesdienst	2.21	0.48	0.03	3.52	1.01	2.13	1.59
85 MW Lufttemperatur unter der Decke	14.44	11.11	10.48	6.99	5.94	11.68	11.32
86 Δ Luft unter Decke	1.91	0.71	0.10	3.13	0.55	2.14	1.41
87 MW Wandtemperaturen über alle Messstellen	13.22	7.46	7.09	3.74	5.21	4.87	6.32
88 MW Zuluft	22.54	15.41	13.76	27.43	13.70	23.21	19.47
89 MW Außentemperatur	5.88	-	-7.02	-4.11	-0.37	-5.41	-0.11

Tabelle C.2: Kennwerte 48-89 für Luftheizung mit Grundtemperierung (LH-G) und instationär betriebene (LH-I). In einigen Fällen wurden einzelne Zeitabschnitte ausgewertet: ¹ 10.11.-7.12.2001, ² 8.12.-21.12.2001, ³ 3.2.-1.3.2000, ⁴ 1.3.-29.3.2000.

	Schenna	Branzoll	Dom Brixen	Karneid	Laag	Prad	St.Pankraz	Sarnthein	Tirol	Vilpian
	LH-G	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I	LH-I
48	-0.76	0.42	0.38	-0.90	-0.57	-3.08	-1.85	0.00	-0.48	-0.55
49	9.53	10.25	7.12	2.94	7.72	3.90	3.87	-2.49	14.84	6.77
50	8.87	11.49	5.30	8.95	13.10	5.33	5.88	4.94	3.77	10.56
51	13.55	22.34	10.30	18.03	17.91	17.59	10.84	11.91	9.80	20.47
52	1.16	1.99	1.64	0.28	1.57	0.52	0.10	1.79	0.51	1.02
53	4.36	8.06	3.43	5.77	4.50	7.26	5.03	6.42	5.41	6.92
54	3.20	7.27	4.13	5.47	8.29	3.33	3.43	2.46	2.37	4.95
55	4.79	3.72	9.51	5.49	4.24	5.17	4.92	6.62	9.64	5.90
56	5.95	5.71	11.15	5.77	5.80	5.69	5.02	8.41	10.16	6.92
57	1.59	-2.35	7.71	-	1.30	-1.57	-0.01	1.99	4.75	0.00
58	5.04	5.04	9.82	8.06	4.27	7.25	6.33	6.81	9.98	7.98
59	8.24	12.31	13.95	13.53	12.56	10.57	9.76	9.27	12.35	12.93
60	4.21	9.98	4.68	7.90	11.07	4.45	5.01	3.15	3.08	7.57
	6.61	9.40	1.80	8.56	8.26	6.13	5.76	2.81	2.42	10.91
61	6.11	5.83	11.43	5.85	6.26	5.71	4.96	9.03	10.36	6.87
62	5.86	5.56	11.40	5.57	6.07	5.45	4.78	8.60	10.13	7.08
63	0.41	0.38	0.54	0.12	0.26	-0.05	-0.19	1.18	0.05	-0.10
64	0.53	-0.46	0.26	-	0.04	0.19	-	0.60	0.02	0.12
65	0.49	-0.35	0.06	-0.83	0.55	0.51	0.19	-0.50	0.67	-0.84
66	0.28	0.38	0.38	0.09	0.25	-0.59	0.09	-0.25	0.42	-0.13
67	0.14	0.88	1.08	0.35	0.72	0.32	-0.46	1.55	0.11	-0.03
68	1.21	3.59	1.46	2.45	2.97	1.07	1.17	2.34	0.92	1.09
69	1.50	-3.06	0.45	-	2.09	0.39	-	1.54	1.12	1.24
70	1.77	-2.63	1.26	-6.18	3.78	2.99	0.21	-0.66	2.88	-3.59
71	-0.20	0.46	0.61	0.03	0.90	-0.62	-0.08	-0.40	0.25	-0.12
72	2.15	8.14	4.47	9.75	8.30	3.81	3.37	3.07	2.13	5.20
73	1.66	4.54	1.75	3.02	3.75	1.59	1.58	3.23	1.36	1.54
74	1.86	-0.45	0.80	-	3.18	0.79	-	2.43	1.88	1.69
75	2.48	-0.67	1.70	-2.74	4.89	3.71	0.52	-0.31	3.42	-1.46
76	0.44	0.79	0.94	0.29	1.45	0.20	0.49	-0.16	1.04	0.11
77	3.02	11.06	5.04	13.23	10.30	4.83	4.71	4.27	2.99	8.48
78	9.04	6.39	11.41	8.32	9.45	7.06	7.62	9.21	11.96	8.65
79	10.96	8.16	12.33	9.94	10.68	9.29	10.60	10.30	15.49	12.03
80	10.21	7.28	11.80	9.03	9.88	7.89	9.66	9.72	13.31	10.56
81	10.55	16.81	13.23	8.19	13.78	10.12	9.19	8.84	13.36	17.83
82	4.98	4.85	2.28	4.51	2.92	4.78	5.25	5.05	2.37	1.86
83	12.56	15.11	12.95	14.33	14.07	11.83	10.79	11.21	12.57	17.83
84	4.26	4.44	0.83	0.93	1.13	5.50	3.69	2.82	1.15	1.00
85	13.50	16.79	13.37	15.47	17.56	12.24	11.39	12.73	12.96	18.24
86	4.04	4.51	1.05	0.86	1.33	5.70	3.51	2.17	1.11	0.92
87	6.25	5.85	9.99	8.69	4.66	7.63	7.20	7.57	10.91	10.13
88	50.50	52.40	18.57	17.89	33.50	15.98	29.23	44.18	21.52	36.84
89	2.78	-4.47	5.87	0.00	0.35	-3.03	-0.04	-0.03	5.00	-

	Branzoll	Neumarkt ⁵	Neumarkt ⁶	Terlan	Tschengels
	FH	FH	FH	FH	FH
Zuluft					
1 Kleinstes Zuluftmaximum	14.85	19.81	19.23	18.28	-
2 Größtes Zuluftmaximum	17.52	23.00	21.25	22.86	-
3 MW der Zuluftmaxima	15.51	20.35	19.65	20.81	-
Absolute Feuchtigkeit					
4 außen - Min abs. Feuchte (Messwerte)	0.00	-	-	2.40	1.30
5 außen - Max abs. Feuchte (Messwerte)	8.50	-	-	8.60	10.80
6 außen - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	5.23	-	-	4.92	5.76
7 außen - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	2.00	-	-	3.06	1.75
8 außen - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	7.62	-	-	6.91	7.54
9 außen - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	5.21	-	-	4.96	5.71
10 innen - Min abs. Feuchte (Messwerte)	0.00	0.00	4.00	0.00	2.80
11 innen - Max abs. Feuchte (Messwerte)	8.10	7.90	7.50	8.70	8.00
12 innen - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	5.43	4.62	5.08	6.37	5.02
13 innen - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	3.62	3.77	4.34	5.01	2.94
14 innen - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	7.21	6.07	5.66	7.60	6.34
15 innen - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	5.41	4.64	5.06	6.40	4.99
16 Orgel - Min abs. Feuchte (Messwerte)	-	-	-	0.00	-
17 Orgel - Max abs. Feuchte (Messwerte)	-	-	-	9.60	-
18 Orgel - Mittel abs. Feuchte (Messwerte)	-	-	-	6.74	-
19 Orgel - Min abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	-	-	5.37	-
20 Orgel - Max abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	-	-	7.99	-
21 Orgel - Mittel abs. Feuchte (Tagesmittel)	-	-	-	6.77	-
Kondensation					
22 Kondensation (Anteil Zeit in %)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23 Taupunktastand < 1 (Anteil Zeit in %)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Relative Feuchtigkeit					
24 Altarraum - MW RH	47.68	35.97	37.47	57.29	34.56
25 Altarraum - MW Δ RH (Heizen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26 Altarraum - MW RHMinima (Heizen)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27 Altarraum - MW Δ RH (TagesMW)	7.13	6.56	3.98	1.25	1.88
28 Altarraum - Max Δ RH (TagesMW)	25.57	15.13	7.32	15.88	8.79
29 Altarraum - Anzahl der Schwankungen	4.00	6.00	5.00	6.00	5.00
30 Altarraum - MW RHMinima (TagesMW)	40.59	32.57	36.57	53.89	31.16
31 Altarraum - Min RHMinima ((TagesMW)	32.21	29.39	31.85	47.50	25.22
32 Orgel - MW RH	57.91	41.21	105.08	63.18	39.79
33 Orgel - MW Δ RH beim Heizen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34 Orgel - MW RHMinima beim Heizen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35 Orgel - MW Δ RH (TagesMW)	9.17	6.79	11.17	0.38	2.24
36 Orgel - Max Δ RH (TagesMW)	28.22	13.28	24.05	10.18	9.70
37 Orgel - Anzahl der Schwankungen	4.00	7.00	4.00	5.00	5.00
38 Orgel - MW RHMinima (TagesMW)	48.94	37.93	99.24	61.06	35.87
39 Orgel - Min RHMinima (TagesMW)	40.03	33.76	89.94	54.56	30.19
40 Decke - MW RH	55.08	36.69	38.62	64.12	38.83
41 Decke - MW Δ RH beim Heizen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42 Decke - MW RHMinima beim Heizen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43 Decke - MW Δ RH (TagesMW)	7.48	7.02	4.19	0.68	2.33
44 Decke - Max Δ RH (TagesMW)	29.55	11.05	7.74	11.55	9.60
45 Decke - Anzahl der Schwankungen	4.00	7.00	5.00	6.00	5.00
46 Decke - MW RHMinima (TagesMW)	46.94	33.83	37.55	62.54	34.88
47 Decke - Min RHMinima (TagesMW)	37.79	30.35	32.62	53.34	28.99
Max aus 25, 33 und 41	9.17	7.02	11.17	1.25	2.33
Min aus 26, 34 und 42	40.59	32.57	36.57	53.89	31.16

Tabelle C.3: Kennwerte 1-47 für Kirchen mit Fußbodenheizung (FH), Bankheizung (BH), Konvektorenheizung (KH) und Gasstrahlerheizung (GH). In einigen Fällen wurden einzelne Zeitabschnitte ausgewertet: ⁵ 1.12.1999-26.1.2000, ⁶ 31.1.-27.2.2000, ⁷ 25.10.-22.11.2001, ⁸ 24.11.-20.12.2001, ⁹ 17.1.-14.2.2001, ¹⁰ 2.3.-30.3.2001.

	Lüsen ⁷	Lüsen ⁸	Prettau	St.Magdalena	St.Pauls	Vals	ev.Kirche Bozen ⁹	ev.Kirche Bozen ¹⁰	Penon
	BH	BH	BH	BH	BH	BH	RH	RH	GH
1	-	-	-	-	-	-	7.43	12.55	9.03
2	-	-	-	-	-	-	62.01	54.74	46.91
3	-	-	-	-	-	-	43.45	26.60	20.51
4	-	0.00	-	1.10	-	0.00	-	-	-
5	-	1.80	-	6.50	-	7.80	-	-	-
6	-	0.27	-	3.15	-	3.72	-	-	-
7	-	0.00	-	1.33	-	2.09	-	-	-
8	-	1.45	-	4.88	-	5.89	-	-	-
9	-	0.28	-	3.15	-	3.73	-	-	-
10	4.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20	-	0.00
11	12.10	9.00	8.90	7.30	5.10	8.80	5.90	-	10.20
12	6.07	5.21	4.58	3.85	3.90	4.55	4.37	-	5.89
13	5.10	3.79	3.09	1.82	3.09	3.12	3.51	-	4.01
14	7.17	6.46	5.53	5.29	4.51	5.49	5.47	-	7.44
15	6.04	5.35	4.57	3.86	3.91	4.55	4.39	-	5.88
16	5.00	0.00	0.00	-	-	0.00	3.20	3.70	-
17	11.10	9.30	9.50	-	-	8.60	6.40	9.40	-
18	6.17	5.33	4.51	-	-	4.65	4.29	6.58	-
19	5.32	3.87	3.07	-	-	3.27	3.41	4.29	-
20	7.24	6.60	5.46	-	-	5.59	5.56	8.36	-
21	6.14	5.47	4.50	-	-	4.65	4.31	6.62	-
22	1.01	6.21	5.07	0.06	0.00	0.18	0.00	0.00	1.74
23	3.10	32.54	12.09	1.51	0.00	0.48	0.00	0.00	7.10
24	67.48	72.13	69.29	67.05	50.62	55.25	62.54	61.64	75.60
25	0.70	0.22	0.36	0.33	4.12	-0.02	16.87	-	-0.54
26	63.54	73.60	69.51	66.57	47.83	54.00	41.36	-	74.42
27	0.23	6.36	12.16	3.95	3.56	8.29	4.19	5.05	16.46
28	20.33	9.09	16.79	36.23	17.31	17.97	22.45	11.14	27.81
29	4.00	6.00	4.00	8.00	4.00	3.00	5.00	6.00	3.00
30	63.46	70.87	63.53	61.90	46.57	50.49	56.96	57.92	69.33
31	51.99	64.51	60.82	34.18	41.09	43.81	46.43	54.54	57.86
32	71.46	77.62	66.02	66.80	0.00	57.87	61.42	-	76.75
33	0.09	0.15	0.69	0.90	0.00	-0.01	2.39	-	18.21
34	68.59	79.40	66.10	65.23	0.00	56.96	59.66	-	57.81
35	2.28	8.66	6.64	2.56	0.00	7.62	3.21	-	20.07
36	18.75	8.66	13.35	35.20	0.00	13.86	11.87	-	30.52
37	3.00	4.00	5.00	9.00	0.00	4.00	3.00	-	3.00
38	66.58	77.57	59.44	62.01	0.00	56.37	57.99	-	69.52
39	57.73	71.43	55.49	34.44	0.00	50.19	53.85	-	58.21
40	67.23	71.27	68.74	64.36	56.58	61.00	61.16	60.87	76.75
41	7.42	10.11	0.81	3.32	2.68	1.32	17.58	-	18.21
42	57.41	63.28	69.48	60.63	53.89	58.80	41.59	-	57.81
43	0.36	6.28	12.01	1.25	2.56	8.43	3.52	5.76	20.07
44	16.72	6.28	18.53	14.90	17.06	17.50	20.54	13.17	30.52
45	4.00	7.00	4.00	9.00	3.00	3.00	5.00	6.00	3.00
46	63.24	71.58	62.37	63.51	51.49	56.45	56.21	57.16	69.52
47	52.80	64.72	59.30	54.49	45.98	50.87	45.91	53.58	58.21
	7.42	10.11	0.81	3.32	4.12	1.32	17.58	-	18.21
	57.41	63.28	66.10	60.63	0.00	54.00	41.36	-	57.81

	Branzoll	Neumarkt ⁵	Neumarkt ⁶	Terlan	Tschengels
	FH	FH	FH	FH	FH
Wand-Luft-Differenzen					
48 Min Δ (Luft-Wand)	-0.55	-0.43	-2.56	-1.09	-0.23
49 Δ (Luft-Außen) bei diesem Minimum	-4.17	12.08	10.96	7.69	3.29
50 Max Δ (Luft-Wand)	2.67	3.61	-1.59	2.84	1.33
51 Δ (Luft-Außen) bei diesem Maximum	1.31	14.83	10.42	13.67	6.46
52 MW Δ (Luft-Wand)	1.07	0.22	-2.24	0.96	0.19
53 MW Δ (Luft-Außen)	5.88	12.60	11.11	10.21	5.07
54 MW Δ (Luft-Wand) (Heizzeit)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55 MW Wandtemperatur	11.35	12.38	13.34	11.52	13.00
56 MW Lufttemperatur	12.41	12.60	11.11	12.48	13.19
57 MW Außentemperatur	6.53	-	-	2.27	8.12
58 MW Wandtemperatur (Heizzeit)	-	-	-	-	-
59 MW Lufttemperatur (Heizzeit)	-	-	-	-	-
60 Mittlere Maxima Δ (Luft-Wand) (Heizzeit)	-	-	-	-	-
84-56	0.95	2.34	0.63	2.13	1.42
Gleichmäßigkeit					
61 MW Temperatur unter der Decke	12.51	11.99	-	12.52	13.61
62 MW Temperatur bei der Orgel oben	11.63	11.99	-	11.96	13.57
63 MW Δ Profil (oben-unten)	0.09	-	-	-0.25	-0.04
64 MW Δ Orgel (oben-unten)	-0.19	-	-	-0.19	-
65 MW Δ Decke (vorn-hinten)	-0.20	-3.65	-2.80	-0.17	-0.68
66 MW Δ Aufenthaltsbereich (vorn-hinten) Heizzeit	-0.13	-0.61	-0.50	-0.60	-2.65
67 MW Δ LuftAufenthaltsbereich	-0.60	-2.39	-15.16	-0.35	-4.57
68 MW Δ Profil (oben-unten) Heizzeit	-	-	-	-	-
69 MW Δ Orgel (oben-unten) Heizzeit	-	-	-	-	-
70 MW Δ Decke (vorn-hinten) Heizzeit	-	-	-	-	-
71 MW Δ Aufenthaltsbereich (vorn-hinten) Heizzeit	-	-	-	-	-
72 MW Δ (Luft-Aufenthaltsbereich) Heizzeit	-	-	-	-	-
73 MW der Maxima (je Heizzeit) von 63	-	-	-	-	-
74 MW der Maxima (je Heizzeit) von 64	-	-	-	-	-
75 MW der Maxima (je Heizzeit) von 65	-	-	-	-	-
76 MW der Maxima (je Heizzeit) von 66	-	-	-	-	-
77 MW der Maxima (je Heizzeit) von 67	-	-	-	-	-
Sonntagsgottesdienste (MW über Gottesdienst)					
78 Min Aufenthaltsbereich (kälteste Messstelle)	14.04	15.03	15.92	14.12	17.94
79 Max Aufenthaltsbereich (wärmste Messstelle)	14.31	15.30	16.01	14.31	22.01
80 MW im Aufenthaltsbereich	14.19	15.16	15.97	14.23	19.98
81 Orgelepore	12.11	12.58	0.00	13.67	15.31
82 Δ im Aufent. während Gottesdienst	1.83	1.24	1.58	1.47	1.05
83 MW Lufttemperatur über alle Messstellen	13.37	14.94	11.74	14.61	14.61
84 Δ Luft während Gottesdienst	1.36	3.65	1.11	1.77	0.92
85 MW Lufttemperatur unter der Decke	13.49	-	-	14.44	15.18
86 Δ Luft unter Decke	1.60	-	-	1.72	1.06
87 MW Wandtemperaturen über alle Messstellen	11.68	13.07	13.90	12.63	13.88
88 MW Zuluft	15.79	20.59	19.99	21.76	0.00
89 MW Außentemperatur	5.58	-	-	2.80	7.60

Tabelle C.4: Kennwerte 48-89 für Kirchen mit Fußbodenheizung (FH), Bankheizung (BH), Konvektorenheizung (KH) und Gasstrahlerheizung (GH). In einigen Fällen wurden einzelne Zeitabschnitte ausgewertet: ⁵ 1.12.1999-26.1.2000, ⁶ 31.1.-27.2.2000, ⁷ 25.10.-22.11.2001, ⁸ 24.11.-20.12.2001, ⁹ 17.1.-14.2.2001, ¹⁰ 2.3.-30.3.2001.

	Lüsen ⁷	Lüsen ⁸	Prettau	St.Magdalena	St.Pauls	Vals	ev.Kirche Bozen ⁹	ev.Kirche Bozen ¹⁰	Penon
	BH	BH	BH	BH	BH	BH	RH	RH	GH
48	-1.91	0.00	-3.15	-0.53	-1.05	-0.11	-0.84	-0.95	-1.03
49	14.09	6.95	1.52	4.63	4.56	9.32	2.90	3.83	12.16
50	4.00	4.63	16.85	7.48	2.04	5.02	3.70	2.68	7.20
51	10.93	16.16	3.45	6.87	7.63	6.12	11.27	5.98	15.43
52	1.64	2.00	0.56	0.59	0.77	1.18	0.07	0.25	0.78
53	8.93	7.08	4.79	3.57	6.08	4.31	1.60	1.93	7.37
54	2.03	2.77	1.61	1.81	0.94	2.35	2.18	0.00	4.01
55	7.29	3.21	4.23	1.92	5.31	6.74	5.38	11.53	6.59
56	8.93	5.21	4.79	2.50	6.08	7.92	5.44	11.78	7.37
57	0.00	-1.86	-	-1.07	-	3.61	3.84	9.84	0.00
58	7.44	4.35	5.49	2.23	5.56	7.22	8.28	-	8.10
59	9.48	7.12	7.10	4.04	6.50	9.57	10.46	-	12.11
60	2.94	3.67	2.20	3.11	1.65	3.13	2.91	-	5.22
	0.97	3.36	1.24	4.37	0.86	3.87	7.31	4.07	5.46
61	8.66	4.89	5.00	2.61	6.11	7.70	5.55	12.13	7.84
62	8.66	4.89	4.89	2.30	0.00	7.72	5.80	12.13	7.84
63	-0.20	-0.21	-	0.18	0.05	0.03	0.15	0.90	0.95
64	-0.08	-0.08	-0.05	-	-	0.30	0.22	0.67	-
65	0.61	0.75	0.10	-0.45	-	-0.03	-0.49	-12.13	-
66	0.61	0.88	-0.05	0.00	-1.12	-0.35	0.07	-0.18	0.06
67	-0.16	-0.29	-0.05	-0.28	-1.38	-0.26	0.15	0.90	0.81
68	-0.28	-0.04	-	0.00	0.25	-0.35	2.12	-	4.84
69	-1.10	-2.19	-0.17	-	-	0.97	2.95	-	-
70	0.50	0.22	-0.11	-0.38	-	-0.35	-0.67	-	-
71	0.49	0.63	-1.28	0.86	-1.85	-2.97	2.44	-	-0.81
72	-0.83	-1.76	-0.28	-1.25	-2.06	-1.69	2.12	-	5.37
73	0.26	0.73	-	0.32	0.72	0.08	3.14	-	5.83
74	0.20	0.12	0.99	-	-	1.50	4.21	-	-
75	0.94	0.91	0.45	-0.04	-	0.05	0.88	-	-
76	2.12	2.28	0.09	2.06	-0.33	-0.86	3.48	-	-0.05
77	0.18	0.03	0.19	-0.17	-0.71	-0.68	3.14	-	6.19
78	10.21	9.25	5.60	5.43	8.30	10.81	11.12	15.47	9.49
79	11.27	12.12	7.54	11.68	11.48	16.70	14.17	17.39	11.11
80	10.73	10.90	6.56	8.58	9.83	13.11	12.65	16.43	10.52
81	11.42	11.92	6.93	4.93	6.77	12.18	11.77	15.86	15.42
82	2.25	3.21	1.81	3.94	1.80	1.58	1.84	1.63	5.38
83	9.90	8.57	6.02	6.88	6.94	11.79	12.75	15.85	12.82
84	1.12	2.09	1.53	3.49	0.96	1.33	1.37	1.10	4.99
85	9.69	8.65	6.04	6.80	7.11	11.55	14.77	18.41	15.42
86	1.18	2.18	1.52	3.44	1.11	1.41	1.36	1.43	5.76
87	7.49	5.20	4.50	3.14	5.88	8.66	9.83	14.23	8.87
88	-	-	-	-	-	-	51.48	41.14	37.75
89	1.00	1.00	-	-2.05	-	2.43	2.84	8.87	-