Untersuchungen zum denkmalverträglichen Feuchteschutz bei sommerlicher Kondensation in Kirchen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH), M.Sc.
Petra Schrimpf
geb. in Würzburg

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

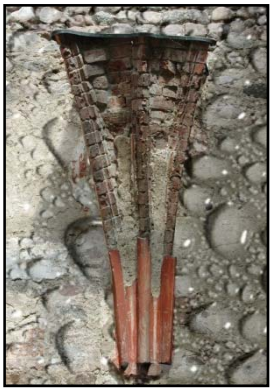
Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Claus Steffan (Technische Universität Berlin)
Gutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Dorothée Sack (Technische Universität Berlin)
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Detlef Liesegang (Beuth Hochschule für Technik Berlin)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Juni 2017

Berlin 2017

Untersuchungen zum denkmalverträglichen Feuchteschutz bei sommerlicher Kondensation in Kirchen



Band 1

Petra Schrimpf

Danksagung

Meinen besonderen Dank möchte ich folgenden Personen entgegenbringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift wohl kaum zustande gekommen wäre:

Frau Professor Dr.-Ing. Dorothée Sack danke ich besonders für Ihre Bereitschaft das, für ihr Fachgebiet ungewöhnliche, Thema zu betreuen und ihre zahlreichen Ratschläge und Hinweise zur Erstellung der Arbeit. Das von ihr initiierte Doktorandenkolloquium war mir immer wieder eine neue Motivation, die Arbeit fortzusetzen.

Des Weiteren gilt mein ausdrücklicher Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Detlef Liesegang für die Anregung, Forschungen zum Themengebiet der Sommerkondensation durchzuführen und diese im Rahmen einer Dissertation zu veröffentlichen. Mit seiner konstruktiven Kritik und der Zurverfügungstellung der Messeinrichtungen wäre die Erstellung der Arbeit nicht möglich gewesen.

Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing.-Klaus Hoffmann und den beteiligten Kirchengemeinden für die tatkräftige Unterstützung.

Besonders bedanke ich mich bei meinem Lebensgefährten Herrn Ulrich Bock, der mich ermutigt hat, ein so langfristiges Vorhaben zu beginnen. Sein Vertrauen in meine Fähigkeit eine Idee in ein wissenschaftliches Werk umzusetzen, waren Ansporn und Rückhalt.

Auch all jenen, die hier namentlich unerwähnt bleiben, jedoch maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Ohne ihre Kritik und ihr Wissen wäre meine Forschungsarbeit niemals so weit gekommen.

Bedanken möchte ich mich auch beim Projektverbund Chancengleichheit für Frauen an der Beuth Hochschule für Technik Berlin, von dem mir im Rahmen des Hypatia-Programms eines Stipendiums gewährt wurde.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit 2
1.2 Forschungsstand 4
1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit 8

2 Bauphysikalische Grundlagen zur Kondensation 17
2.1 Kondensation 17
2.2 Raumlufttemperatur 20
2.3 Relative Luftfeuchte 20
2.4 Oberflächentemperatur 23
2.5 Taupunkttemperatur 24

3 Feuchteeinwirkungen auf historische Bausubstanz 27
3.1 Wasseraufnahme in flüssiger Form 29
3.1.1 Grundwasser 29
3.1.2 Regen- und Spritzwasser 29
3.1.3 Leckagen 30
3.1.4 Von oben eindringende Feuchtigkeit 30
3.1.5 Kapillarer Feuchtetransport 31
3.2 Wasseraufnahme in gasförmiger Form 36
3.2.1 Windeinpressung feuchter Luft 36
3.2.2 Nutzungsfeuchte 36
3.2.3 Kondensation und Kapillarkondensation 37
3.2.4 Adsorption und Absorption der Luftfeuchtigkeit 39
3.2.5 Hygroskopisch bedingte Feuchtigkeit 39
3.3 Zusammenfassung Feuchteschäden 43

4 Auswirkungen infolge Kondensation 45
4.1 Auswirkungen auf die Raumschale 45
4.2 Auswirkungen auf Einrichtungsgegenstände 46

5 Darstellung der Messmethoden und Untersuchungen 51
5.1 Messungen in den Kirchen 52
5.1.1 Messungen der Luftfeuchtigkeit 54
5.1.2 Messung der Lufttemperatur 55
5.1.3 Messung der Oberflächentemperatur des Baustoffes 56
5.1.4 Messung der Baustofffeuchtigkeit vor Ort 58

5.1.5 Erfassung der "Öffnungszeiten" von Türen und Fenstern ... 60
5.1.6 Erfassen von Nutzern ... 60
5.2 Untersuchungen im Labor ... 60
5.2.1 Messung der Baustofffeuchtigkeit im Labor ... 61
5.2.2 Ermittlung der Sorptionseigenschaften ... 62
5.2.3 Messung der hygroskopischen Feuchtigkeit durch Salze ... 62
5.3 Angewandte Verfahren ... 64

6 Darstellung und Auswertungen der Messwerte ... 69
6.1 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit ... 69
6.2 Taupunkttemperatur und Oberflächentemperatur ... 74
6.3 Auftreten von Kondensation ... 76
6.4 Analyse der bauschädlichen Salze ... 79
6.5 Feuchtemessungen ... 80
6.6 Bewertungsgrundlagen ... 81

7 Beantwortung der Forschungsfragen ... 85
7.1 Einfluss der Lage ... 88
7.1.1 Ausrichtung ... 89
7.1.2 Einfluss der Topografie ... 90
7.2 Einfluss der Bauzeit ... 94
7.3 Einfluss der baulichen Eigenschaften ... 95
7.3.1 Dicke der Außenwand ... 95
7.3.2 Baumaterial ... 99
7.3.3 Fensterflächen ... 102
7.3.4 Einfluss des Raumvolumens ... 104
7.4 Einfluss des Klimas ... 106
7.5 Einfluss der Lüftung, Beheizung und Temperierung ... 109
7.5.1 Einfluss der Lüftung ... 109
7.5.2 Einfluss der Beheizung und Temperierung ... 112
7.6 Einfluss der Nutzung ... 116
7.7 Einfluss der Salze ... 119
7.8 Auftreten von jahreszeitlich bedingter Sommerkondensation ... 120
7.9 Zusammenfassung ... 125

8 Maßnahmen zur Schadensreduzierung und -vermeidung ... 131
8.1 Beheizung und Temperierung ... 131
8.1.1 Heizsysteme ... 133
8.2 Lüftung ... 140
8.2.1 Lüftungsbezogene Risiken ... 140

8.2.2 Mechanische Lüftung 142
8.2.3 Natürliche Lüftung 143
8.2.4 Manuelle Lüftung 145
8.3 Heizen oder Lüften 150
8.4 Bauliche Maßnahmen 151
8.5 Zusammenfassung der Maßnahmen 154

9 Zusammenfassung und Ausblick 157

Abbildungsverzeichnis 161

Tabellenverzeichnis 163

Literaturverzeichnis 164

Anlage - Erfassungsbogen 173

Abkürzungsverzeichnis

BA	Badingen
BE	Betzin
FA	Fahrland
GM	Großmutz
GU	Gutengermendorf
HB	Hindenburg
HO	Hoppenrade
PF	Potsdam - Pfingstgemeinde
RB	Ribbeck
SE	Selbelang
SF	Staffelde
ST	Storkow
LT	Lufttemperatur
LF	Luftfeuchtigkeit
rH	relative Luftfeuchtigkeit (relative Humidity)
OT	Oberflächentemperatur
TP	Taupunkttemperatur
N	Nord
S	Süd
W	West
O	Ost
i	innen
a	außen
OK	Oberkante
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

1 Einleitung

Die Sommerkondensation ist ein jahreszeitlich bedingtes Phänomen, bei dem Wasserdampf einen Phasenübergang von seinem gasförmigen Zustand zu einem flüssigen Zustand erfährt.
Diese "einfache" Erklärung" stellt den Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Sommerkondensation, dem Entstehen von Feuchteproblemen und dem Erhalt historischer Bausubstanz jedoch nicht her.

Die Anwendung der Bauphysik hat seit den 1970er Jahren an Bedeutung gewonnen (Energiekrise 1973). Helmut KÜNZEL schreibt in seinem Buch "Bauphysik - Geschichte und Geschichten" zum Umgang der Denkmalpflege mit der Bauphysik:

> "Im Bereich der Denkmalpflege konnten die Erkenntnisse der Bauphysik noch nicht richtig Fuß fassen. Dies mag mit den unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Denkmalpfleger (vielfach Kunsthistoriker) und der Bauphysiker zusammenhängen, die sich auch durch Forschungsaktivität in Abstimmung mit den Denkmalämtern am Ende des 20. Jahrhundert nicht nennenswert angenähert haben.[1]"

Dies bedeutet, dass der Denkmalpfleger zur Erforschung eines Bauwerkes kunstgeschichtliche Methoden wie das Quellenstudium anwendet. Der Bauphysiker nutzt naturwissenschaftliche Methoden wie die Durchführung von Messungen und deren Auswertung.

Die beiden Wissenschaftsdisziplinen "Bauphysik und Denkmalpflege" haben traditionell wenig Zugang zueinander. Physikalische Gesetzmäßigkeiten gehören nicht notwendigerweise zur Kernkompetenz des bauhistorisch orientierten Denkmalpflegers. Dem Bauphysiker fehlt dagegen das kulturgeschichtliche Verständnis für die Bausubstanz und deren Erhalt. Die im Rahmen der Masterarbeit mit dem Thema "Sommerkondensation in historischer Bausubstanz - Untersuchungen in der Dorfkirche Birkholz"[2] gemachten Feststellungen haben dies bestätigt.
Aus dieser Erfahrung geleitet, sollen die in der Vergangenheit gewonnenen Erkenntnisse differenzierter betrachtet werden und dem bauphysikalischen Laien, aber auch Fachleuten, ein Instrumentarium an die Hand gegeben werden, um das Phänomen der Sommerkondensation zu verstehen, Zusammenhänge herzustellen und Maßnahmen für den Erhalt historischer Bausubstanz ableiten zu können.

[1] Künzel 2002, S. 22.
[2] Schrimpf 2005

Interdisziplinäres bauphysikalisches und denkmalpflegerisches Arbeiten erweitert das eigene Handlungsspektrum und ermöglicht sachgerechte Problemlösungen. Dadurch sollen unwirksame, kostenintensive und teilweise schädigende Maßnahmen vermieden werden. Ein Denkmal bleibt nur solange ein intaktes Gebäude, wie seine Bausubstanz nicht nur durch konservatorische, sondern auch durch konstruktive - insbesondere mit Hilfe bauphysikalischer - Maßnahmen geschützt wird. Die Zusammenführung der Wissenschaftsbereiche Bauphysik und Denkmalpflege ist ein Ziel dieser Arbeit.

Das Bestreben der Denkmalpflege nach Wiederherstellung eines möglichst ursprünglichen Zustands, Ausdruck des Prinzips der Authentizität und die Bewahrung der Denkmaleigenschaft stehen in keinem Widerspruch zu den Bemühungen der Bauphysik das Gebäude vor Schäden und Zerfall zu schützen.

Die Wissenschaftsdisziplin " Bauphysik" stellt für die Erhaltung und Nutzung historischer Bausubstanz eine untrennbare Verbindung mit den denkmalpflegerischen Belangen dar. Es werden bauphysikalische Zusammenhänge in Bezug auf die Sommerkondensation in den Vordergrund gestellt und demgemäß Hinweise zu deren Reduzierung und Vermeidung gegeben.

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Fahrten durch das Land Brandenburg zeigen, dass eine große Zahl von Kirchengebäuden in den letzten Jahren mit großem finanziellem Aufwand restauriert wurden. Andererseits wird bei genauerem Hinsehen deutlich, dass ähnliche "Schadensbilder"[3] auch - und gerade bei - diesen "frisch" restaurierten Bauwerken anzutreffen sind. Dies sind vorerst allgemein "Feuchteschäden". Als Ursachen kommen aufsteigende Feuchtigkeit, hygroskopische Salze und Kondensationsphänomene, die gegebenenfalls durch Sommerkondensation entstanden sind, in Frage. Inwiefern "Sommerkondensation" ursächlich und wie häufig diese anzutreffen ist, soll in dieser Arbeit untersucht werden. Zu Bestätigung, ob Sommerkondensation vorliegt, sind weitere Messungen und Analysen für die Abgrenzung zu anderen Feuchteschadenphänomenen erforderlich.

Bei der Sommerkondensation handelt es sich um ein bauphysikalisches Phänomen, deren Auftreten optische und bauliche Beeinträchtigungen der Bausubstanz verursacht, die eine

[3] Duden: Ein Schaden ist "etwas, was die Gegebenheit, die bestehende Situation in einer negativen, nicht wünschenswerten Weise verändert" oder zu einer teilweisen Zerstörung und zu einer entstandenen Einbuße führt.

Gefährdung der Existenz des Denkmals darstellen können. Wegen der langsamen Schadenentwicklung nehmen Verantwortliche, Eigentümer und Denkmalpfleger der betroffenen Immobilien diese Erscheinung nur als lästige Petitesse wahr oder verwechseln sie mit anderen Feuchteproblemen. Umfang und Häufigkeit des Auftretens von Sommerkondensation werden nicht registriert, auftretende Mängel in ihrer Kausalität nicht erkannt. Deshalb ist es von grundsätzlicher Bedeutung, denjenigen, die sich um die Erhaltung des Kulturgutes "Baudenkmal" bemühen, Werkzeuge an die Hand zu geben, mit deren Hilfe sie das Auftreten der Sommerkondensation beurteilen können. Zunächst ist daher zu ermitteln, welche Bedeutung die Sommerkondensation durch die Häufigkeit ihres Auftretens innerhalb eines bestimmten Beobachtungszeitraums für das Bauwerk hat. Es wird hier vom Nachweis durch Quantifizierung gesprochen. Um einen solchen Nachweis zu erbringen, sind unter anderem Messungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit der Luft sowie der Oberflächentemperaturen der Baustoffe erforderlich.
Das jahreszeitliche Auftreten der Sommerkondensation wird durch Messungen festgehalten und Gleichartigkeiten in der Kausalität des Erscheinens bei den unterschiedlichen Untersuchungsobjekten miteinander verglichen. Soweit die untersuchten Bauwerke bautechnisch und bauphysikalisch vergleichbar sind, sollen die Bedingungen für das Auftreten der Sommerkondensation herausgestellt werden.

Nach Feststellung der bauphysikalisch messbaren Merkmale - Sommerkondensation, aufsteigende Feuchtigkeit und hygroskopische Salze -, ist die Abschätzung des Schadenspotenzials durch die Sommerkondensation ein weiterer Schritt einer ganzheitlichen Betrachtung. Dabei wird der Begriff "Schadenspotenzial" hier in der Weise definiert, dass ein Bauwerk und seine Bestandteile bei Vorliegen bestimmter Merkmale durch Feuchtigkeit gefährdet sind. Die Gefährdung konkretisiert sich durch das Eintreten des Schadens. Diesen gilt es, durch frühzeitiges Erkennen zu vermeiden.

Das Erkennen des Auftretens von Sommerkondensation kann verständlicherweise durch die Personen erfolgen, die die gefährdeten Gebäude mehrfach im Laufe eines Jahres besuchen. Dazu gehören, bei im Land Brandenburg anzutreffenden Sakralbauten, in erster Linie die Pastoren und andere Mitarbeiter der Kirchengemeinde. In Profanbauten, wie Museen, historischen Verwaltungsgebäuden, genutzten und ungenutzten Bauwerken sind dies die dort tätigen Mitarbeiter. Der staatliche Denkmalpfleger ist dies nur selten, da er nur sporadisch, in der Mehrzahl auf Anforderung hin, die Gebäude besucht. Daraus ergibt sich, dass Adressaten der Hinweise und Anleitungen Laien im weitesten Sinne seien werden. Dies impliziert wiederum, dass die Beurteilungskriterien keine spezifische Ausbildung erfordern dürfen. Die Person, der das Bauwerk anvertraut wurde, muss mit einfachen, ein-

deutig anzuwendenden Maßstäben das mögliche Auftreten von Sommerkondensation beurteilen können. Um die Sommerkondensation von anderen in historischen Gebäuden häufig auftretenden Feuchteerscheinungen mit ähnlichem Erscheinungsbild zu differenzieren, werden die Unterschiede zwischen diesen dargestellt.

Mit der Kenntnis der Abgrenzung dieser Feuchteschadensphänomene können den Verantwortlichen geeignete Vermeidungs- und Reduzierungsvorschläge an die Hand gegeben werden.

Faustformelartig sollen die Untersuchungs- und Verhaltensanweisungen formuliert sein. Gelingt dem Nutzer der Kirche deren Umsetzung, dann ist die Wahrscheinlichkeit für einen sorgsamen Umgang hinsichtlich des Auftretens von Sommerkondensation mit dem Bauwerk groß.

Die Fragen, die in diesem Zusammenhang beantwortet werden sollen, sind:

- Wie kann Sommerkondensation vom Nutzer der Kirche erkannt und diagnostiziert werden?
- Welche Kirchen sind in besonderem Maß der Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation ausgesetzt und anhand welcher Faktoren (Parameter) kann eine Vorhersage dazu getroffen werden, ob Sommerkondensation auftreten wird?
- Mit welchen Maßnahmen kann Sommerkondensation vermieden bzw. reduziert werden?

1.2 Forschungsstand

Während zu den Themen "aufsteigende Feuchtigkeit" und "hygroskopische Feuchte durch Salze" umfangreiche Fachliteratur vorhanden ist, kann für den Bereich der Sommerkondensation gesagt werden, dass hier ein Mangel an ausreichend fundierten Forschungen vorliegt.

Um das Phänomen der Sommerkondensation zu beschreiben wird häufig nur der Begriff selbst definiert und der bauphysikalische Vorgang beschrieben. Weiter wird das Auftreten von Sommerkondensation als Lüftungsproblem bezeichnet und Hinweise auf die Vermeidung des Schadensproblems gegeben. Dies betrifft zum einen eine geregelte und dem Raumklima angepasste Lüftung und andererseits die Möglichkeiten einer Temperierung[4]

[4] Großeschmidt 2012, S. 13.: Beim "**Temperieren**" findet die kontinuierliche Beheizung der Gebäudehülle […] aller Stockwerke statt.

bzw. Beheizung[5] des Gebäudes. Grundlegend wird darauf hingewiesen, dass das Auftreten von Sommerkondensation von der Bauart, der Oberflächentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. Selten werden hierbei historische Gebäude betrachtet. Vielmehr stehen Keller im Fokus der Betrachtungen. Insofern wird auf eine dezidierte Aufstellung dieser Fundstellen verzichtet und lediglich einige Beispiele aufgeführt.
In der allgemeinen Literatur zur Bauphysik wird die Tauwasserbildung infolge von Sommerkondensation bei WILLEMS[6] beschrieben. Hier werden Gebäude mit "massigen bzw. erdberührten Außenwänden (z.B. Kirchen)" in Zusammenhang mit einer sommerlichen Belüftung des unbeheizten Raumes als anfällig für das Auftreten von Sommerkondensation genannt. Die "massiven Außenwände mit einer großen Wärmespeicherfähigkeit passen sich im Frühjahr den Lufttemperaturen nur langsam an". Durch eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur kann sich Tauwasser an den kalten Bauteiloberflächen niederschlagen. WILLEMS nennt das Frühjahr als den Zeitpunkt der größten Gefahr für das Auftreten von Sommerkondensation.

Hinweise unter dem Begriff der Sommerkondensation in Normen finden sich in beispielsweise DIN EN 15026 "Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation"[7]. Hier wird beschrieben, wie Sommerkondensation mit Hilfe unterschiedlicher Simulationsmodelle vorhergesagt werden könnte. Diese Verfahren setzen jedoch exakte baustoffliche Kenntnisse voraus, die in den untersuchten Kirchen auf Grund der Unkenntnis über die genauen Materialeigenschaften der dicken Außenmauern nicht angewandt werden können. Dies wäre nur durch eine umfassende und nicht zerstörungsfreie Untersuchung (z.B. Kernbohrung zur Baustoffentnahme) möglich. Ein Vergleich mit den Mindestanforderungen an den Wärmeschutz zur Vermeidung von Kondensationsproblemen, wie sie in DIN 4108-2 "Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz"[8] genannt werden, kann durch Berechnungen eines Kennwertes aus diesem Grund ebenfalls nicht angewandt werden.

In Zeitschriftenartikeln, wie etwa von FISCHER-HOYER und WEISS[9], wird am Beispiel des Bamberger Doms dargelegt, dass das Problem der Sommerkondensation bekannt ist, nicht unterschätzt werden soll und diesem durch entsprechende Lüftungsmaßnahmen vorgebeugt werden kann. In genutzten und temperierten Gebäuden wie dem Bamberger Dom

[5] Großeschmidt 2012, S. 11.: Beim "**Heizen**" findet die Beheizung der Luft der Räume bei Bedarf statt. Nach offizieller Anschauung besteht die Aufgabe des Heizens darin, während der Raumnutzungszeiten die Raumlufttemperatur zu erhöhen.
[6] Willems u.a. 2006, S. 41.
[7] DIN EN 15026:2007-07, S. 4ff.
[8] DIN 4108-2:2013-02, S. 15.
[9] Fischer-Hoyer/Weiß 2006, S. 26.

sind häufig geregelte Lüftungsanlagen eingebaut, die zu hohen Luftfeuchten und damit einer möglichen Sättigung des Wasserdampfes entgegenwirken. Hinweise zu temporär genutzten und unbeheizten Gebäuden werden in dieser Quelle nicht gegeben.

Auch in Tagungsbänden zur MUTEC[10] wie bei GRAUPNER[11] wird der physikalische Vorgang der Sommerkondensation kurz dargestellt. Er schreibt: "Die Taupunkttemperatur der Außenluft ist jahreszeitlich bedingt wesentlich höher als im Winter, jedoch ist die raumseitige Oberflächentemperatur nicht in gleichem Maße angestiegen (Auswirkung der winterlichen Auskühlung)." Er weist darauf hin, dass zur Vermeidung von Sommerkondensation eine Grundheizung unumgänglich ist. Im Weiteren gibt er Hinweise zum richtigen Lüften und nennt die Oberflächentemperatur als Kriterium für den richtigen Lüftungszeitpunkt. Er weist darauf hin, dass die Oberflächentemperatur der Umfassungsbauteile durch eine Beheizung heraufgesetzt werden soll. In vielen Kirchen ist dies jedoch nicht möglich, da Heizmöglichkeiten entweder fehlen oder für diesen Zweck nicht ausreichend ausgelegt sind.

Die Arbeit von LÖTHER[12] stellt die Wirkung der Temperierung auf die Verhinderung von Feuchteschäden dar. Dabei zeigt er die Möglichkeiten und Grenzen einer Bauteiltemperierung und einer Grundtemperierung im Rahmen einer Gebäudetemperierung zur Verhinderung von Sommerkondensat auf. Der Begriff des Sommerkondensats wird von ihm in Anlehnung an ARENDT[13] als "Stellen, wo große Bauteilmassen (Kirchen, Burgen) tiefe Temperaturen weit in wärmere Witterungsperioden hinein speichern" und dort "bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur Feuchte auf einer Bauteiloberfläche ausfällt". In seinen Ausführungen beschreibt LÖTHER, dass es keine einheitliche Begriffsbestimmung für den Terminus "Temperierung" gibt. Seine Arbeit hat das Ziel, eine "Vereinheitlichung" herzustellen, um Temperieranlagen zu vergleichen und beurteilen zu können.
Temperieranlagen sind in den, für diese Arbeit untersuchten, Kirchen nicht vorhanden[14] und der Einbau auf Grund finanzieller und denkmalpflegerischer Gegebenheiten nicht möglich.

KÜNZEL[15] beschreibt das Phänomen der Sommerkondensation in seinem Werk "Bauphysik und Denkmalpflege" hinsichtlich seiner Wirkzusammenhänge. Er schreibt, dass die Lufttemperatur in unbeheizten Gebäuden von der Außenlufttemperatur, der Wärmeleitung durch die Bauteile und die Sonneneinstrahlung bestimmt wird. Durch die Abhängigkeit des

[10] MUTEC - Internationale Fachmesse für Museums- und Ausstellungstechnik
[11] Graupner 2001, S. 76.
[12] Löther 2005, S. 17ff.
[13] Arendt 2003, S. 94.
[14] Ausnahme: Kirche in Potsdam, bei der partiell wasserführende Rohre vor einer Wand installiert wurden
[15] Künzel 2007, S. 42.

Raumklimas vom Außenklima hinkt die Raumlufttemperatur der Außenlufttemperatur hinterher. Durch das Bestreben der Nutzer im Frühjahr ein Gebäude durch das Öffnen der Fenster und Türen zu erwärmen, wird Feuchtigkeit in das Gebäude "gelüftet". Die höhere absolute Luftfeuchtigkeit der Außenluft führt zu Tauwasserniederschlägen an den unterkühlten Außenwänden.
Weiter zeigt er Lösungsmöglichkeiten zur Vermeidung von Feuchteschäden durch Sommerkondensation auf. Dies sind die Bauteiltemperierung und ein gesteuertes Lüften in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchte.
Aufgrund des finanziellen und von kleinen Kirchengemeinden nicht tragbaren Aufwands[16] muss eine Möglichkeit gefunden werden, mit geringen Aufwand das Auftreten von Sommerkondensation zu minimieren und schädlichen Feuchteerscheinungen vorzubeugen.

Das Phänomen der Sommerkondensation und die Auswirkungen auf die Bausubstanz werden in der allgemeinen und einschlägigen Literatur nur am Rande behandelt. Die in der Literatur beschriebene Tatsache, dass Gebäude mit "dicken Außenmauern" und einer unsachgemäßen Lüftung betroffen sind, ist nicht ausreichend, um das Phänomen der Sommerkondensation auf jede Kirche übertragen zu können. Gerade bei Kirchen, die nur temporär genutzt und beheizt werden, muss eine Möglichkeit gefunden werden, mit Hilfe der Festlegung von Beurteilungskriterien eine Vorhersage zum Auftreten von Sommerkondensation treffen zu können, um daraus geeignete Maßnahmen abzuleiten.

Im Rahmen der Masterarbeit "Sommerkondensation in historischer Bausubstanz - Untersuchungen in der Dorfkirche Birkholz"[17] wurde bisher festgestellt:

- Ob Sommerkondensation in Kirchen auftritt kann nur durch bauphysikalische Messungen festgestellt werden.
- Das Auftreten von Sommerkondensation wird durch die Möglichkeit der Erwärmung der Bausubstanz, den solaren Wärmeeintrag über die Fenster und nutzungsspezifische Faktoren (z.B. Anzahl der Personen, Lüftungsverhalten) beeinflusst. Ebenso sind baukonstruktive Eigenschaften (z.B. Dicke der Außenwand, Dichtheit der Fenster) aber auch durch die Hygroskopizität der Baustoffe und vor allem die klimatischen Verhältnisse im Innen- und Außenraum von Bedeutung.
- Eine Abgrenzung zu weiteren Feuchteschäden (aufsteigende Feuchtigkeit, hygroskopische Schäden durch das Vorhandensein bauschädlicher Salze) ist notwendig.
- Primär ist ein falsches Lüftungsverhalten für das Auftreten von Sommerkondensation verantwortlich.

[16] nach Aussagen der Kirchenverantwortlichen
[17] Schrimpf 2005

- Eine Reduzierung bzw. Vermeidung von Sommerkondensation kann durch gezieltes Lüften oder eine Temperierung des Kirchenraums erreicht werden.

Da zur Erstellung der Masterarbeit nur in einer Kirche Messungen durchgeführt wurden, sollen die bisher gewonnenen Erkenntnisse durch vertiefenden und ergänzende Untersuchungen auf ein breiteres Fundament gestellt werden.

Aus den Ergebnissen zur Feststellung des Forschungsstands kann ableitet werden, dass es einer weitergehenden Forschungsarbeit auf diesem Gebiet bedarf, um generalisierende Prinzipien festzulegen und die bisherigen Erkenntnisse zu verifizieren. Diese Arbeit soll den Ansatz dazu bieten.

Insofern sei angemerkt, dass die für diese Arbeit untersuchten Kirchen mit den darin aufgetretenen Mängeln und Schäden aus der Vergangenheit, die durchgeführten Messungen und die daraus gewonnenen Ergebnisse die primäre Quelle dieser Arbeit darstellen. Aus den Messdaten, deren Auswertung und der Betrachtung der vorgefundenen Feuchteerscheinungen werden die Wirkzusammenhänge zwischen der Nutzung der Kirche (Lüften und Veranstaltungen) und dem Auftreten von Sommerkondensation dargestellt. Es werden daraus Handlungshinweise für die Kirchennutzer abgeleitet, wie Kirchen vor Sommerkondensation geschützt werden können.

1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Um die Fragestellung ausreichend beantworten zu können, waren denkmalpflegerische Untersuchungen und bauphysikalische Messungen in Kirchen erforderlich. Da die Kirchen vergleichbar sein sollten, wurden zunächst über Recherchen im DEHIO[18] Kirchen in kleinen, ländlichen Gemeinden Brandenburgs (Ausnahme: Kirche in Potsdam) erfasst, die sich aufgrund der Lage und der Errichtungszeit entsprechen.
Weitere Erhebungen wie beispielsweise den Zustand und die Zugänglichkeit der Kirchen wurden durch telefonische Nachfrage bei den Denkmalschutzbehörden, dem Bauamt der Evangelischen Kirche Berlin-Brandenburg-schlesische Oberlausitz und den Kirchengemeinden durchgeführt. Auf der Grundlage dieser ersten Ergebnisse wurde ein Erfassungsbogen (s. Anlage) erstellt und 39 Kirchen im nördlichen und westlichen Land Brandenburg besichtigt.

[18] Dehio 2000

Inhalt des Erfassungsbogens waren folgende Parameter:

- Lage und Ausrichtung der Kirche ⇨ Verschattung, Ost-West oder Nord-Süd
- Errichtungsjahr bzw. Bauzeit
- Raumvolumen ⇨ Kubatur
- Material der Umfassungswände und der Bauteiloberflächen ⇨ Dicke, Putz
- Fensterflächen ⇨ solare Wärmegewinne
- Lüftungsmöglichkeiten ⇨ Fenster, Türen
- Beheizungs- bzw. Temperierungsmöglichkeiten ⇨ Bank-, Wand-, Fußheizung, Einzelofen
- Zustand ⇨ erfolgte und geplante Sanierungs- bzw. Umbaumaßnahmen, Schäden
- Einrichtung und Ausstattung des Kirchenraumes ⇨ Inventar, Winterkirche
- Nutzung der Kirche ⇨ Gottesdienste, Veranstaltungen
- Anbringungsmöglichkeiten der Messfühler
- Stromversorgung der Messeinrichtung

In jeder Kirche wurde zunächst ein schematisches Aufmaß zur überschlägigen Berechnung der Kubatur und Fensterflächen vorgenommen. Das Material der Wandoberflächen innen und außen wurde bestimmt und der Zustand der Kirche und deren Einbauten bewertet. Die Feststellung, welche Beheizungs- bzw. Temperierungs- und Lüftungsmöglichkeiten vorliegen war obligatorisch. Durch Rücksprache mit den Kirchenverantwortlichen konnten Angaben über die voraussichtliche Anzahl der Kirchenbesucher und die Häufigkeit der Kirchennutzung erfragt werden. Die Möglichkeit der Stromversorgung für die Messgeräte und die Zugänglichkeit waren wichtige Kriterien für die Aufnahme einer Kirche in die Untersuchungsreihe.

Auf Grundlage der Auswertung der Erfassungsbögen wurden folgende zwölf Kirchen ausgewählt (in alphabethischer Reihenfolge):

Kirche	**Badingen**
Bauzeit	2. Hälfte 13. Jahrhundert[19]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Feldsteinsaal mit eingezogenem Rechteckchor und schiffsbreitem Westturm Satteldach Feldsteinmauerwerk, innenseitig verputzt Winterkirche Bankheizung Lüftungsmöglichkeit über Tür und Fenster Verfärbungen und Abplatzungen des Putzes
Messzeitraum	01.04.2005 bis 14.11.2005

[19] Dehio 2000, S. 40-41.

Kirche	Betzin
Bauzeit	1887[20]
Kurzbeschreibung	Nord-Süd-Ausrichtung Saalkirche mit eingezogenem Südchor und Nordturm Satteldach Ziegelmauerwerk, innenseitig verputzt Winterkirche ohne Heizmöglichkeit im Kirchenschiff Lüftungsmöglichkeit über Tür biogener Bewuchs im Sockelbereich außen, Ablösung der Farbschichten unterhalb der Fenster
Messzeitraum	01.04.2006 bis 25.01.2007

Kirche	Fahrland
Bauzeit	1709[21]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Einschiffiger Backsteinbau mit Westquerturm Satteldach Ziegelmauerwerk, außen und innen verputzt keine Heizmöglichkeit Lüftungsmöglichkeit über Fenster Ablösungen des Putzes außen oberhalb des verblendeten Sockels, partielle Ablösung der Putzschicht innen, Verfärbungen des Putzes
Messzeitraum	01.02.2006 bis 25.01.2007

Kirche	Großmutz
Bauzeit	1814/1815[22]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Neugotischer Feldsteinbau mit quadratischem Westturm Satteldach Feldstein, außen teilweise verputzt, innen verputzt keine Heizmöglichkeit Lüftungsmöglichkeit über Tür und Fenster Verkrustungen im Spitzwasserbereich außen, innen Verfärbungen und partielle Putzabplatzungen
Messzeitraum	05.04.2005 bis 14.11.2005

[20] Schwarz/Metzger 2003, S. 187-188.
[21] Dehio 2000, S. 270.
[22] Dehio 2000, S. 408.

Kirche	Gutengermendorf
Bauzeit	Mitte 13. Jhrd.[23]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Saalbau mit Westquerturm Satteldach Feldsteinmauerwerk, innenseitig verputzt Fußheizung Lüftungsmöglichkeit über Türen Putzabplatzungen und Salzausblühungen im unteren Wandbereich innen
Messzeitraum	05.04.2005 bis 14.11.2005

Kirche	Hindenburg
Bauzeit	2. Hälfte 13. Jhrd.[24]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Feldsteinsaal mit eingezogenem Rechteckturm Satteldach Feldsteinmauerwerk, Chor außenseitig verputzt, innenseitig verputzt Winterkirche keine Beheizung im Kirchenbereich (Schiff und Chor) Lüftungsmöglichkeit über Tür und Fenster Besonderheit: ständige Lüftung über Gazefenster von Frühjahr bis Herbst biogener Bewuchs im Sockelbereich außen, Ablösungen der Farbschichten innen, partiell Krustenbildung und Putzabplatzungen
Messzeitraum	13.04.2005 bis 14.11.2005

Kirche	Hoppenrade
Bauzeit	1895[25]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Rechteckiger Saalbau mit eingebundenem Süd-Ost-Turm Satteldach, Tonnengewölbe innen Ziegelmauerwerk, innenseitig verputzt Winterkirche Einzelofen im Kirchenschiff Lüftungsmöglichkeit über Tür Ablaufspuren an den Fenstern innen, Abplatzungen und Ablösungen der Farbschichten, Rissbildungen und Putzabplatzungen
Messzeitraum	01.02.2006 bis 24.01.2007

[23] Dehio 2000, S. 427.
[24] Dehio 2000, S. 450-451.
[25] Dehio 2000, S. 784-785.

Kirche	Pfingstgemeinde Potsdam
Bauzeit	1893[26]
Kurzbeschreibung	Nord-Süd-Ausrichtung Rechteckiger Saalbau mit Nordturm und östlich angebautem Gemeindehaus Satteldach, Walm auf der Nordseite Ziegelmauerwerk, innenseitig verputzt Bankheizung und Wandheizung Lüftungsmöglichkeit über Tür Verkrustungen und schadhafte Verfugungen im Sockelbereich außen, Putzabplatzungen und Ablösungen der Farbschichten innen, Ablaufspuren an den Wänden unterhalb der Decke
Messzeitraum	01.02.2006 bis 25.01.2007

Kirche	Ribbeck
Bauzeit	2. Hälfte 13. Jhrd.[27]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Rechteckiger Feldsteinquaderbau mit quadratischem Westturm Östlich abgewalmtes Satteldach Feldsteinmauerwerk mit Ausbesserungen aus Ziegeln und partiellem Putz, innenseitig verputzt Winterkirche Einzelofen im Kirchenschiff Lüftungsmöglichkeit über Tür Fugenauswaschungen, Abbrüche der Ziegelkanten und Ablösung von Putzschichten außen, Ablösungen der Farbschichten innen
Messzeitraum	01.04.2005 bis 14.11.2005

Kirche	Selbelang
Bauzeit	1440[28]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Spätgotischer Backsteinbau, eingezogener Chor und Westturm Satteldach Ziegelmauerwerk, innenseitig verputzt Winterkirche Bankheizung Lüftungsmöglichkeit über Tür und Fenster Rissbildung in der Fassade, Abplatzungen des Putzes und der Farbschichten innen, Ablaufspuren an den Fenstern, Verfärbungen
Messzeitraum	01.02.2006 bis 25.01.2007

[26] Dehio 2000, S. 462-463.
[27] Dehio 2000, S. 935.
[28] Dehio 2000, S. 998.

Kirche	Staffelde
Bauzeit	Ende 15. Jhrd.[29]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Rechteckiger Backsteinbau und verbrettertem Westturm Östlich abgewalmtes Satteldach Ziegelmauerwerk mit Feldsteineinlagen, innenseitig verputzt Winterkirche Bankheizung Lüftungsmöglichkeit über Tür und Fenster Putzabplatzungen an Decke und Wänden sowie Fehlstellen an den Farbschichten und Verfärbungen innen
Messzeitraum	01.03.2006 bis 25.01.2007

Kirche	Storkow
Bauzeit	2. Hälfte 13. Jhrd.[30]
Kurzbeschreibung	Ost-West-Ausrichtung Rechteckiger Feldsteinsaal mit schiffsbreitem Westturm Satteldach Feldsteinmauerwerk, innenseitig verputzt Winterkirche Bankheizung Lüftungsmöglichkeit über Türen und Fenster biogener Befall des Feldsteinsockels außen, Ablösung von Farbschichten und Putzabplatzungen sowie Rissbildungen innen
Messzeitraum	13.04.2005 bis 14.11.2005

In den zwölf ausgewählten Kirchen wurden Messstationen, bestehend aus Messfühlern für die Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte im Inneren der Kirche und im Außenbereich sowie Oberflächentemperaturfühlern für die Baustoffoberfläche angebracht und Datenloggern aufgebaut. Diese wurden so programmiert, dass Messungen im 30-Minuten-Rhythmus erfolgten. Die Messergebnisse wurden monatlich ausgelesen und die ordnungsgemäße Funktion der Messgeräte dabei kontrolliert. Aufgrund der Anzahl der zur Verfügung stehenden Messeinrichtungen wurden die ausgewählten Kirchen an zwei aufeinander folgenden Jahren (2005 und 2006) untersucht. In beiden Jahren wurden die Untersuchungen in jeweils sechs Kirchen durchgeführt.

Ergänzend wurden bausubstanzschonend Baustoffproben zur Feststellung der vorhandenen Salze und der Baustofffeuchtigkeit entnommen. Feuchtemessungen erfolgten an der

[29] Dehio 2000, S. 1017.
[30] Dehio 2000, S. 1031.

Innenoberfläche der Außenwände. Es wurde ein Aufmaß der Genauigkeitsstufe I als Grundlage für die genauere Berechnung der Kubatur und der Fensterflächen, sowie der Feststellung der Wanddicken und zur Übersicht der räumlichen Gegebenheiten innerhalb der Kirche angefertigt. Dieses Aufmaß diente auch der Verortung der Umgebung der Kirche (Bäume, weitere Gebäude, Straßen) in Form eines Lageplans.

Die Lüftungszeiten und die Anzahl der Kirchennutzer wurden empirisch durch, für die Kirche verantwortliche, Personen gesammelt und in einem Datenblatt handschriftlich aufgezeichnet.

Zur baugeschichtlichen und baulichen Beschreibung der Kirche wurden die - teilweise knappen - Quellen (Dehio, Kirchenbauamt, Landesbauamt, Kirchengemeinden) ausgewertet. Hierbei wurde die Priorität auf bauliche Veränderungen in der Vergangenheit gelegt. Als Beispiele seien hier das Einbringen einer Dränage und Bauwerksabdichtungen genannt.

Im Labor wurden Untersuchungen der Baustoffproben im Trockenschrank und unter definierten raumklimatischen Bedingungen in einem Klimaschrank vorgenommen und die bauschädlichen Salze analysiert.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Bände. Der erste Band umfasst die Forschungsarbeit selbst. Band 2 ist als Katalogband der einzelnen Kirchen zu verstehen.

Nach der Einleitung in Kapitel 1 des ersten Bandes werden in Kapitel 2 zunächst die bauphysikalischen Grundlagen erläutert und das zum Verständnis notwendige bauphysikalische Vokabular konkretisiert.

In Kapitel 3 werden Feuchteschadenspotenziale in Folge von Wasseraufnahme in flüssiger und in gasförmiger Form aufgezeigt, um diese zu den in Kapitel 4 aufgestellten Feuchteerscheinungen durch Sommerkondensation abzugrenzen. Diese Feuchteschadensphänomene beziehen sich allgemein auf historische Bausubstanz, speziell auf Gebäude mit dicken Außenwänden, die unbeheizt oder nur temporär beheizt werden. Bei den untersuchten Kirchen handelt es sich um solche Gebäude.

In Kapitel 5 werden die angewandten Mess- bzw. Untersuchungsmethoden zur Mangel- bzw. Schadensdiagnose beschrieben. Es wird aufgezeigt, welche Messverfahren erforderlich und sinnvoll sind, um die zur Auswertung notwendigen Schlüsse für die Beantwortung der Fragen zu ziehen. Dies betrifft einerseits die Messungen in den Kirchen und anderseits ergänzende Untersuchungen im Labor.

In Kapitel 6 wird die Möglichkeit der Auswertung der Messdaten anhand von erstellten

Grafiken vorgestellt und erläutert. Diese Aufstellung der Messergebnisse erfolgt im ersten Band beispielhaft anhand der Kirche in Selbelang und dient der generellen Übersicht der Auswertungen. Im zweiten Band der Arbeit können diese für jede der zwölf Kirchen eingesehen werden.

Kapitel 7 fasst die Auswertungen und Ergebnisse der Datenerfassung zusammen. Auf deren Grundlage werden in diesem Kapitel die gestellten Fragen beantwortet. Dies trifft die Fragen, unter welchen Umständen es zur Sommerkondensation in den betrachteten Kirchen kam und welche Parameter dafür verantwortlich waren.

Lösungsvorschläge zur Schadensreduzierung und Schadensvermeidung durch Sommerkondensation werden in Kapitel 8 aufgezeigt. Hierbei werden Ablaufdiagramme zur fachgerechten Untersuchung und Beurteilung derartiger Schäden aufgestellt und dem, für die Einhaltung klimatischer Verhältnisse im Inneren der Kirche, Verantwortlichen eine Handlungsanweisung an die Hand gegeben.

Den Abschluss dieses ersten Bandes bildet das Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung der Arbeit und der Ausblick auf weitere forschungsrelevante Aspekte zum Thema Sommerkondensation.

Im zweiten Band der Arbeit werden die untersuchten Kirchen vorgestellt. Baugeschichte, Baubeschreibung und bauliche Maßnahmen in der Vergangenheit zeigen auf, welche Mängel und Schäden am und im Kirchengebäude aufgetreten sind. Es werden die vorgenommenen Untersuchungen anhand von Grafiken der Messdaten dokumentiert.

2 Bauphysikalische Grundlagen zur Kondensation

Ob und in welchem Umfang Sommerkondensation auftritt, wird durch Messung bzw. Berechnung der folgenden Parameter erfasst:

- Raumlufttemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Oberflächentemperatur
- Taupunkttemperatur

Diese Begriffe werden definiert und bauphysikalische Zusammenhänge der einzelnen Parameter erläutert. Dieser Erläuterung wird die Begriffsbestimmung der Kondensation vorangestellt sowie der Unterschied zwischen Winter- und Sommerkondensation aufgezeigt und der bauphysikalische Vorgang der Kapillarkondensation erläutert.

2.1 Kondensation

Unter Kondensation wird im Allgemeinen der Übergang eines Stoffes (hier: Wasserdampf) vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatszustand verstanden. Dieser Vorgang ist abhängig von der Taupunkttemperatur und dem Wasserdampfsättigungsdruck. Zum einen wird bei gleichbleibender Raumlufttemperatur Wasserdampf in Form von Luftfeuchtigkeit zugeführt, sodass die Sättigungsmenge der Luft erreicht wird. Zum anderen tritt Kondensation dann auf, wenn die Temperatur bei konstantem Wasserdampfgehalt reduziert und damit die Taupunkttemperatur erreicht wird[31].

Der Vorgang der Kondensation findet nicht ausschließlich sichtbar auf Bauteiloberflächen (z.B. Glasscheiben von Fenstern) statt. Vielmehr lagert sich die Feuchtigkeit in den unterschiedlich großen Poren innerhalb eines Baustoffes an (Adsorption) und ein (Kapillarkondensation).

Zur Beurteilung, welche Maßnahmen erforderlich sind, um Kondensation zu vermeiden, ist es zweckmäßig, zwischen Winter- und Sommerkondensation zu differenzieren sowie die Anreicherung von Feuchtigkeit innerhalb eines Baustoffes, die Kapillarkondensation, zu betrachten.

Nach KÜNZEL[32] definiert sich die "Sommerkondensation" als Vorgang, bei dem feuchtwarme Außenluft in einen unbeheizten oder nur temporär beheizten Raum einströmt und

[31] Balak/Pech 2008, S. 10.
[32] Künzel 2009, S. 17.

dort zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur führt. Die "Winterkondensation" wird durch die klimatischen Verhältnisse im Raum verursacht.

Sowohl der Sommerkondensation als auch der Winterkondensation liegt der gleiche bauphysikalische Zusammenhang zugrunde, dass warme Luft auf kalte Bauteiloberflächen trifft.
Bei der "Sommerkondensation" kühlt sich die hereingelüftete warm-feuchte Außenluft an den, durch den Winter noch kalten, Umfassungsbauteilen ab.

Bei der "Winterkondensation" trifft warme Raumluft - beispielsweise bei zu schnellem Aufheizen eines Raumes - auf die kalten Bauteiloberflächen.

Die Begriffe "Sommerkondensation" und "Winterkondensation" sind demnach nicht der astronomischen oder meteorologischen Jahreszeit zuzuordnen. Sie beschreiben den bauphysikalischen Vorgang, dass Tauwasser (Kondensat) auftreten kann, wenn eine Taupunktunterschreitung bei kalten Bauteiloberflächen auf Grund des Zusammentreffens mit warmer Luft stattfindet. Im "Sommer" kann die Kondensatgefahr durch gezielte Lüftungsvorgänge, im "Winter" durch die Temperierung der Bauteiloberflächen gemindert werden.

Das Phänomen der Sommerkondensation tritt dann auf, wenn große Wandmassen (Kirchenmauern, Burgmauern, Kellermauern) Wärmeenergie[33] noch weit in wärmere Witterungsperioden hinein speichern[34].

Die Auswirkungen von Sommerkondensation auf die Bausubstanz werden oft unterschätzt. Anders als bei Regen oder Feuchtefilmen auf Bauteiloberflächen ist bei der Kondensation in der Regel kein "sichtbares" Wasser festzustellen.

Wird die normalerweise in Kirchenräumen übliche relative Luftfeuchtigkeit von 50 bis 80% rH durch "Hereinlüften" von feucht-warmer Luft erhöht, stellt sich schnell eine Sättigung der Luft mit Wasserdampf ein. An den kalten Bauteiloberflächen kondensiert dann die warme, gesättigte Raumluft. Eine Durchfeuchtung der oberflächennahen Baustoffschichten ist die Folge.

Bei der Winterkondensation tritt Kondensat an der gesamten Raumschale auf, wenn diese kühle Oberflächen aufweist (z.B. an Fensterlaibungen). Dahingegen sind Schäden durch Sommerkondensation weitgehend auf den unteren Wandbereich und kalte Gebäudeecken beschränkt.

[33] Unter "Wärmeenergie" wird hier die Bewegung von Atomen und Molekülen innerhalb eines Stoffes oberhalb der thermodynamischen Temperatur von -273,15 °C verstanden.
[34] Arendt/Seele 2001, S. 111.

Die Sommerkondensation tritt weitaus häufiger auf als laienhaft angenommen. Während im Winter wegen der kühlen Außentemperaturen auf eine Lüftung verzichtet wird, ist das Bedürfnis groß, in den Frühsommermonaten durch warme Luft ein Gebäude zu "erwärmen". Oftmals wird argumentiert, dass der "Wintermief" aus dem Bauwerk gelüftet werden soll. Das Gegenteil ist der Fall. Eine Wasserdampfdiffusion bzw. ein Luftaustausch findet wegen des Bestrebens der Luft, ein Dampfdruckgefälle auszugleichen, in der Regel von warmer Außenluft zur kalten Innenluft statt. Es wird also die warme Luft hereingelüftet und nicht die kalte, "miefige" Luft hinaus. Da warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann, erhöht sich dementsprechend die relative Luftfeuchtigkeit im Inneren des Gebäudes (vgl. Kap. 2.3).

Es kann also zunächst festgestellt werden, dass die Sommerkondensation primär ein "Lüftungsproblem" ist. Dieses ist jedoch in Zusammenhang mit der Wärmespeicherfähigkeit der großen Bauteilmasse einer Kirche zu sehen, die den Erwärmungsprozess des Bauteils vermindert. In Kapitel 8 wird aufgezeigt, zu welchem Zeitpunkt gelüftet werden sollte und welche weiteren Maßnahmen zur Schadensvermeidung sinnvoll sind.

Diese jahreszeitliche Kondensation tritt jedoch nicht nur an Bauteiloberflächen auf, vielmehr sind auch die Kapillaren innerhalb des Baustoffgefüges betroffen. Dieser Vorgang wird als Kapillarkondensation bezeichnet.

Bei der Betrachtung des Ausfalls von Tauwasser wird vorausgesetzt, dass die Wasserdampfsättigungskonzentration - also 100% relative Luftfeuchte - erreicht wird. Bei der Kapillarkondensation kann bereits vor Erreichen der Wasserdampfsättigungskonzentration Kondensat in Kapillarporen in Form von Wasser ausfallen. Je nach Porengröße können die Kapillaren bereits bei einer Luftfeuchtigkeit von 70-80%[35] mit Wasserdampf gesättigt sein. Die Tauwasserbildung ist demzufolge vom Porenradius der Kapillaren abhängig: Je kleiner der Porendurchmesser, desto größer ist die durch die Kapillarkondensation ausfallende Feuchtigkeitsmenge.

Die Kapillarkondensation ist für die Ausgleichsfeuchte verantwortlich. Die Ausgleichsfeuchte wird auch als Gleichgewichtsfeuchte (fälschlicherweise auch oft als "praktischer Feuchtegehalt") bezeichnet und erläutert den Feuchtegehalt eines Baustoffes bezogen auf die relative Luftfeuchtigkeit. Sie wird mittels Sorptionsisothermen beschrieben. Die Aufnahme des Wassers erfolgt bei der Kapillarkondensation durch die Aufnahme von Feuchtigkeit in die Poren des Baustoffes (Adsorption).

[35] Balak/Pech 2008, S. 10.

Das Raumklima beeinflusst durch die Aufnahme der Feuchtigkeit durch den Baustoff bzw. durch die Abgabe von Feuchtigkeit des Baustoffes an die Raumluft die Ausgleichsfeuchte.

Zur Beurteilung, ob Sommerkondensation auftritt, müssen die Parameter Raumlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Oberflächentemperatur messtechnisch erfasst werden. Aus den Werten der Raumlufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit wird die Taupunkttemperatur berechnet bzw. aus Tabellenwerken abgelesen und mit dem Wert der Oberflächentemperatur verglichen. Liegt die Oberflächentemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur tritt Kondensat auf. Daher werden diese Begriffe in den folgenden Kapiteln erläutert, um das Phänomen der Sommerkondensation bauphysikalisch einordnen zu können.

2.2 Raumlufttemperatur

Die Raumlufttemperatur bezeichnet die in einem Raum herrschende Lufttemperatur[36], die mit der Strahlungstemperatur der Umfassungsflächen eine zusammenfassende Temperaturgröße darstellt. Sie definiert zusammen mit der Luftfeuchte und der Luftqualität (CO_2, Schadstoffe, Gerüche) das Raumklima.
Die Raumlufttemperatur wird in °C angegeben und mit Thermometern gemessen.

2.3 Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte beschreibt als dimensionsloser Wert oder als prozentuale Angabe den Wasserdampfgehalt in der Luft. Der vorhandene Wasserdampfgehalt - auch: absolute Luftfeuchte oder Wasserdampfkonzentration - wird mit der maximalmöglich aufnehmbaren Wasserdampfmenge der Luft (Wasserdampfsättigungskonzentration) ins Verhältnis gesetzt. Bei prozentualer Angabe der relativen Luftfeuchte ergeben sich Werte zwischen 0% bis 100%. Wird sie dimensionslos angegeben, liegt dieser Wert zwischen 0 und 1.

Formel 2.1 $$\phi = \frac{c}{c_s} \quad [-]$$

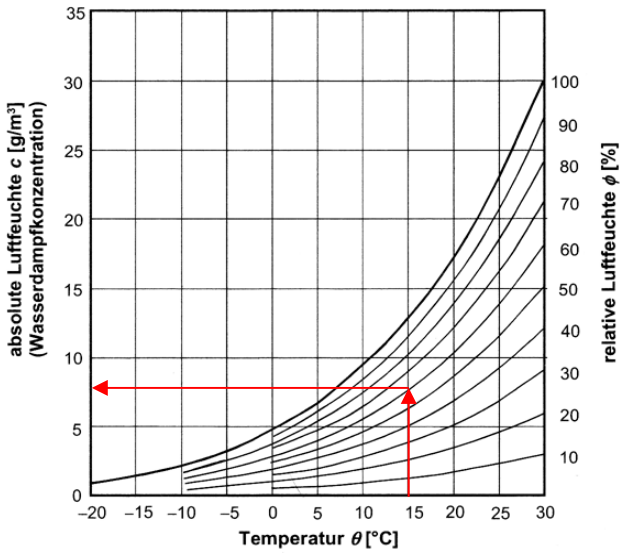
Φ	relative Luftfeuchtigkeit	-
c	absolute Luftfeuchte	g/m³
c_s	Wasserdampfsättigungskonzentration	g/m³

[36] Im Gegensatz zur Raumlufttemperatur ist der Begriff der Lufttemperatur eine maßgebende Größe für die Angabe der Temperatur der Außenluft in bodennaher Atmosphäre.

Die relative Luftfeuchte wird mit einem Hygrometer gemessen. Mittels eines Thermo-Hygrometers kann sowohl die Lufttemperatur als auch die relative Luftfeuchtigkeit gemessen werden.

Exkurs: Absolute Luftfeuchte c (Wasserdampfkonzentration)

Die absolute Luftfeuchte c beschreibt die auf ein Luftvolumen bezogene, tatsächlich gespeicherte Menge an Wasserdampf. Sie ist von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abhängig und wird in g/m³ angegeben. Je höher die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte, desto mehr Feuchtigkeit kann die Luft aufnehmen. Deutlich wird dies am sogenannten Carrier-Diagramm:



Beispiel:

Bei einer Temperatur von 15°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% kann die Luft ca. 7,7 g/m³ Wasser aufnehmen.

Abb. 2.1: Carrier-Diagramm[37]

Eine Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit kann mit der, nach c umgestellten, Formel 2.1 erfolgen. Hierzu müssen die relative Luftfeuchte und die Wasserdampfsättigungskonzentration bekannt sein.

Die absolute Luftfeuchte erlaubt eine Aussage über die Bestimmung des richtigen Lüftungszeitpunkts, um das Auftreten von Sommerkondensation zu vermindern (s. Kap. 8).

Exkurs: Wasserdampfsättigungskonzentration c_s

Als Wasserdampfsättigungskonzentration c_s wird die maximale Menge an Wasser in 1 m³ Luft bei einer bestimmten Temperatur bezeichnet. Die Werte können aus Tabelle 1 abgelesen oder mit der Formel 2.2 berechnet werden. Hierzu ist die Kenntnis des temperaturabhängigen Wasserdampfsättigungsdrucks p_s notwendig. Dieser kann Tabelle C.1 der DIN 4108-3 "Wärmeschutz und Energieeinsparung von Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung"[38] entnommen werden.

[37] Hohmann u.a. 2004, S. 106.
[38] DIN 4108-3:2014-11, S. 73.

Formel 2.2 $$c_s = \frac{2{,}165 \cdot \mathrm{p_s}}{\mathrm{T}} \quad \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

c_s	Wasserdampfsättigungskonzentration	g/m³
p_s	Wasserdampfsättigungsdruck	Pa
T	Temperatur (0°C = 273 K)	K

Tabelle 1: Wasserdampfsättigungskonzentration c_s bei Temperaturen Θ von -10 bis 30°C [39]

Θ [°C]	c_s [g/m³]	Θ [°C]	c_s [g/m³]	Θ [°C]	c_s [g/m³]	Θ [°C]	c_s [g/m³]
-10	2,13	0	4,84	10	9,38	20	17,25
-9	2,32	1	5,18	11	9,99	21	18,28
-8	2,52	2	5,55	12	10,64	22	19,37
-7	2,74	3	5,93	13	11,32	23	20,51
-6	2,98	4	6,34	14	12,04	24	21,71
-5	3,24	5	6,78	15	12,80	25	22,97
-4	3,51	6	7,24	16	13,60	26	24,30
-3	3,81	7	7,73	17	14,44	27	25,68
-2	4,13	8	8,25	18	15,33	28	27,14
-1	4,47	9	8,80	19	16,26	29	28,66
0	4,84	10	9,38	20	17,25	30	30,26

Beispiel:

Bei einer Temperatur von 15°C lässt sich in Tabelle 1 eine Wasserdampfsättigungskonzentration c_s von 12,80 g/m³ ablesen. Unter Verwendung der Formel 2.1 errechnet sich bei einer relativen Luftfeuchte ϕ von 60% (entspricht 0,6) eine absolute Luftfeuchte c von:

$$\mathrm{c} = \mathrm{c_s} \cdot \phi = 12{,}80 \cdot 0{,}6 = 7{,}68 \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{m^3}} \; (gerundet\; 7{,}7)$$

Die Temperaturabhängigkeit der relativen Luftfeuchte bewirkt, dass die Luft bei höheren Temperaturen mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann als bei niedrigeren Temperaturen.

Beispiel:

Bei einer Temperatur von 5°C lässt sich in Tabelle 1 eine Wasserdampfsättigungskonzentration c_s von 6,78 g/m³ ablesen. Unter Verwendung der Formel 2.1 errechnet sich bei einer relativen Luftfeuchte ϕ von 80% (entspricht 0,8) eine absolute Luftfeuchte c von:

$$\mathrm{c} = \mathrm{c_s} \cdot \phi = 6{,}78 \cdot 0{,}8 = 5{,}42 \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{m^3}}$$

[39] in Anlehnung an Tabelle C.2 in DIN 4108-3:2014-11, S. 74.

Es befindet sich demnach bei geringeren Temperaturen weniger Wasserdampf in der Luft, obwohl die relative Feuchtigkeit höher ist.

2.4 Oberflächentemperatur

Unter der Oberflächentemperatur versteht man die an der Bauteiloberfläche der raumbegrenzenden Fläche (Wand, Decke, Fußboden) gemessene Temperatur. Sie hängt im Wesentlichen von folgenden Baustoffeigenschaften ab:

- Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Baustofffeuchtegehaltes
- spezifische Wärmekapazität
- Rohdichte

den veränderlichen Zustandsgrößen

- Raumlufttemperatur
- Lufttemperatur außen

sowie weiteren Faktoren wie

- Wärmeübergangskoeffizient
- Sonneneinstrahlung
- Windgeschwindigkeit

Diese Einflussfaktoren können teilweise gemessen werden. Im Übrigen werden sie berechnet oder baustoffliche Kennwerte aus Tabellenwerken abgelesen.

Da bei historischen Gebäuden die Baustoffeigenschaften sowie das Baustoffgefüge häufig nicht bekannt sind bzw. aus denkmalpflegerischer Sicht eine zerstörungsfreie Untersuchung der Baustoffe nicht möglich ist, kann die Oberflächentemperatur nicht berechnet werden. Es fehlen zudem stoffliche Kennwerte hierfür. Daher wird die Oberflächentemperatur mittels Messfühlern auf der Bauteiloberfläche erfasst. Diese Messung ist von besonderer Wichtigkeit, da durch die alleinige Aussage der Raumlufttemperatur nicht auf die Oberflächentemperatur geschlossen werden kann. Hierzu sind Messungen an den kältetechnisch ungünstigen Flächen wie in Raumecken, in bodennahen Bereichen oder auf nordseitigen Oberflächen erforderlich.

Zusätzlich zu Messungen der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ist die Messung der Oberflächentemperatur unabdingbar. Aus diesen Werten kann die Taupunkttemperatur berechnet werden.

2.5 Taupunkttemperatur

Die Temperatur, bei der die vorhandene Wasserdampfkonzentration c der Wasserdampfsättigungskonzentration c_s entspricht, wird als Taupunkttemperatur bezeichnet. Da Luft bei einer relativen Luftfeuchte von 100% - dies entspricht der Wasserdampfsättigungskonzentration c_s - mit Wasserdampf gesättigt ist, fällt bei weiterer Abkühlung der Luft der Anteil der nicht mehr speicherbaren Feuchtigkeit als Wasserdampf aus. Die Kenntnis der Taupunkttemperatur ist demnach für die Beurteilung des Auftretens von Sommerkondensation von besonderer Bedeutung.

Mit den Messergebnissen der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte kann die Taupunkttemperatur berechnet werden.

Formel 2.3 bei Θ >°C

$$\Theta_s = \Phi^{\frac{1}{8,02}} \times (109,8 + \Theta) - 109,8 \quad [°C]$$

Formel 2.4 bei Θ <°C

$$\Theta_s = \Phi^{\frac{1}{12,30}} \times (148,6 + \Theta) - 148,6 \quad [°C]$$

Θ_S	Taupunkttemperatur	°C
Φ	relative Luftfeuchtigkeit	-
Θ	Lufttemperatur	°C

Beispiel:
Die Lufttemperatur Θ wurde mit 15°C und die relative Luftfeuchte ϕ mit 60% rH gemessen. Es errechnet sich eine Taupunkttemperatur von:

$$\Theta_s = 0,60^{\frac{1}{8,02}} \times (109,8 + 15) - 109,8 = 7,3\ °C$$

Die Lufttemperatur Θ wurde mit 5°C und die relative Luftfeuchte ϕ mit 80% rH gemessen. Es errechnet sich eine Taupunkttemperatur von:

$$\Theta_s = 0,80^{\frac{1}{8,02}} \times (109,8 + 5) - 109,8 = 1,8\ °C$$

Wird die Raumlufttemperatur auf Werte unterhalb der Taupunkttemperatur abgekühlt (hier: 7,3°C bzw. 1,8°C) so fällt Tauwasser bzw. Kondensat an. Ein Vergleich der Taupunkttemperatur mit der Oberflächentemperatur zeigt also, ob Sommerkondensation aufgetreten ist.

Näherungsweise kann die Taupunkttemperatur folgender Tabelle entnommen werden:

Tabelle 2: Taupunkttemperatur der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte [40]

Lufttemperatur	Taupunkttemperatur θ_S der Luft in °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit Φ von [%]											
θ in °C	30	40	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
30	10,5	14,9	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1
29	9,7	14,0	17,5	19,0	20,4	21,7	23,0	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1
28	8,8	13,1	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1
27	8,0	12,2	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1
26	7,1	11,4	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25	6,2	10,5	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	5,4	9,6	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	4,5	8,7	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22	3,6	7,8	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
21	2,8	6,9	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	1,9	6,0	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,2	19,2
19	1,0	5,1	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18	0,2	4,2	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	-0,6	3,3	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	-1,4	2,4	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	-2,2	1,5	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	-2,9	0,6	9,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	-3,7	-0,1	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	-4,5	-1,0	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-5,2	-1,8	1,0	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-6,0	-2,6	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2
9	-7,6	-3,8	-0,8	0,5	1,7	2,8	3,8	4,8	5,7	6,6	7,4	8,2
8	-8,4	-4,7	-1,8	-0,5	0,7	1,8	2,9	3,8	4,8	5,6	6,5	7,2
7	-9,3	-5,6	-2,7	-1,4	-0,2	0,9	1,9	2,9	3,8	4,7	5,5	6,3
6	-10,1	-6,5	-3,6	-2,3	-1,1	-0,1	1,0	1,9	2,8	3,7	4,5	5,3
5	-11,0	-7,4	-4,5	-3,2	-2,1	-1,0	0,0	1,0	1,8	2,7	3,5	4,3

[40] in Anlehnung an Tabelle C.3 in DIN 4108-3:2014-11, S. 75.

3 Feuchteeinwirkungen auf historische Bausubstanz

Unter "Feuchtigkeit" wird Wasser in flüssiger Form und unter "Luftfeuchtigkeit" der Gehalt an Wasserdampf in der atmosphärischen Luft verstanden.
Im Fachgebiet der Bauphysik tritt der Begriff Feuchtigkeit sinngemäß im Themenbereich der "Feuchteschäden" auf. Unter Feuchteschaden wird der erhöhte Feuchtegehalt in einem Baustoff und daraus entstehenden Schäden verstanden. Jeder Baustoff kann eine unterschiedliche Menge an Wasser (in flüssiger und dampfförmiger Form) aufnehmen.
Wasser kann in Baustoffen sowohl als chemisch gebundenes Wasser, als Kapillarwasser oder als Sorptionswasser (Haftwasser) vorkommen.

Chemisch gebundenes Wasser
Unter "chemisch gebundenem Wasser" werden Wasseranteile verstanden, die fest im Baustoff gebunden sind - zum Beispiel in Gips oder Beton. In Zusammenhang mit Bauschäden durch Feuchtigkeit kann das chemisch gebundene Wasser i.d.R. unberücksichtigt bleiben.

Kapillarwasser
Die Wasseraufnahme eines Baustoffgefüges hängt von seiner Porenstruktur und dem Umgebungsklima ab. Für den Feuchtetransport bzw. die Feuchtespeicherung sind Poren mit unterschiedlichen hydraulischen Radien (RH) verantwortlich.
Auch für den Feuchtigkeitstransport innerhalb eines Baustoffgefüges sind die verschiedenen Porenformen (offene und geschlossene Poren, Sackporen), die Porengröße und der Porenanteil verantwortlich (s. auch Kap. 3.1.5).

Sorptionswasser
Nahezu alle Baumaterialien nehmen - abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit - Wasser aus der Umgebungsluft auf. Das heißt: Sie adsorbieren Feuchtigkeit. Dieser Vorgang nennt sich Adsorption und das adsorbierte Wasser entsprechend Sorptionswasser. Ausgedrückt wird die Sorptionsfähigkeit eines Baustoffes durch seine Sorptionsisotherme. Hierbei wird der Feuchtegehalt in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei konstanten Temperaturen dargestellt.
Der Verlauf der baustoffspezifischen Sorptionsisothermen lässt Rückschlüsse auf die Porenradienverteilung zu. Baumaterialien haben die Eigenschaft, ihren Feuchtegehalt ständig zu verändern. Sind diese Materialien durch hygroskopische Salze belastet, so können sie übermäßig viel Wasser aus der Luft aufnehmen da sie Feuchtigkeit aus der Luft binden und

an ihre Kristallstruktur anlagern. Die reine Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft führt jedoch nicht zwangsläufig zu Feuchteschäden. Vielmehr müssen weitere Bedingungen vorliegen, die im Folgenden beschrieben werden.

Wasser in seinen unterschiedlichen Aggregatszuständen (fest, flüssig und gasförmig) stellt bei Bauwerken eine der größten Schadensverursacher dar. Wasser in fester Form - also gefrorenes Wasser - kann nur vorkommen, wenn Wasser in flüssiger und gasförmiger Form vorlag und aufgrund von Witterungseinflüssen die Möglichkeit des Gefrierens besteht. Durch eine Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren kann es zu Abplatzungen, so genannten Frostsprengungen, kommen. Für die Betrachtung von Feuchteproblemen und den daraus entstehenden Schäden in historischer Bausubstanz kann das Vorliegen von Wasser in festem Aggregatszustand zunächst vernachlässigt werden, da es bereits gilt, Feuchtigkeit in flüssigem und gasförmigem Zustand zu vermeiden.
Es wird daher im Weiteren zwischen diesen beiden Aufnahmemechanismen unterschieden:

Wasseraufnahme[41]	
in flüssiger Form durch	**in gasförmiger Form durch**
Kapillarer Feuchtetransport (aufsteigende Feuchte)	Adsorption und Absorption der Luftfeuchtigkeit
Von oben eindringende Feuchtigkeit	Hygroskopisch bedingte Feuchtigkeit
Leckagen	Kapillarkondensation
Oberflächen- und Sickerwasser	Kondensation
Regen- und Spritzwasser	Nutzungsfeuchte
Grundwasser	Windeinpressung feuchter Luft

In den Kapiteln 3.1 und 3.2 werden diese Wasseraufnahmemechanismen näher erläutert und die Bedeutung für die Beurteilung von Feuchteproblemen in historischer Bausubstanz dargestellt. Dabei wird herausgestellt, welche Arten der Wasseraufnahme zur Abgrenzung allgemeiner Feuchteschadensphänomene in Bezug zur Sommerkondensation wichtig sind.

Treten Feuchteschäden auf, so hat dies nicht nur schädigenden Einfluss auf die Bausubstanz. Vielmehr wird zunächst auch das optische Erscheinungsbild der Bauteiloberflächen zerstört, das Raumklima negativ beeinflusst und durch die dann einzuleitenden Maßnahmen (Beheizen, Lüften) die Energiebilanz des Gebäudes schlechter. Dies trifft auch auf die untersuchten Dorfkirchen zu.

Feuchtigkeit in Form von flüssigem Wasser ist zudem ein Transportmittel für aggressive und bauschädigende Substanzen und ist daher zu vermeiden.

[41] vgl. Balak/Pech 2008, S. 1. und Maier 2012, S. 104.

3.1 Wasseraufnahme in flüssiger Form

Bei den in vorstehender Tabelle aufgeführten Möglichkeiten der Wasseraufnahme in flüssiger Form stellt der kapillare Feuchttransport den wichtigsten Faktor dar, um Feuchteschäden durch Sommerkondensation von weiteren - durch Feuchtigkeit entstandenen - Mängeln und Schäden abzugrenzen (s. Kap. 3.1.5).

Dem Mechanismus des kapillaren Feuchtetransports liegt zugrunde, dass Wasser in flüssiger Form vorliegt. Dies kann durch Grundwasser, Regen- und Spritzwasser, Oberflächen- und Sickerwasser sowie konstruktive Beeinträchtigungen (Leckagen, undichte Dächer) anfallen. Diese Wasseraufnahmeformen werden dem kapillaren Feuchtetransport vorangestellt.

3.1.1 Grundwasser

Erhöhte Grundwasserstände sind möglicherweise Ursache für kapillar aufsteigende Feuchtigkeit. Erreicht der Grundwasserspiegel die Gebäudeunterkante (Fundament, Bodenplatte), werden die Kapillaren des Baustoffes an die Feuchtigkeit angebunden. Ein Transport der Feuchtigkeit von "unten" nach "oben" wird möglich. Durch diesen Feuchtetransport können gelöste Salze innerhalb des Baustoffes transportiert werden (s. Kap. 3.2.5).

Da der Grundwasserspiegel weder räumlich noch zeitlich konstant ist, muss dieser für jedes Objekt bei der zuständigen Behörde (z.B. Untere Wasserschutzbehörde der Landkreise) erfragt werden. Sind keine Angaben über den Grundwasserstand vorhanden, so muss dieser anhand der Erstellung eines Bodengutachtens, dem Ausheben von Erkundungsgräben oder durch Setzen eines Grundwasserpegels ermittelt werden. Starke Niederschläge, längere Trockenphasen oder Wasserentnahmen können den Grundwasserstand jedoch verändern.

Zur Beurteilung, ob entstandene Feuchteschäden auf einen hohen Grundwasserpegel zurückzuführen sind, ist die Kenntnis des Grundwasserstandes, des Schichtenaufbaus des Bodens, die Art und Tiefe der Bauwerksgründung und der verwendeten Baustoffe notwendig.

3.1.2 Regen- und Spritzwasser

Vertikale Gebäudeteile werden durch ablaufendes Regenwasser gefährdet. An windexponierten Gebäudeseiten kann Regenwasser durch den Windeintrag an die Bauteiloberfläche gelangen. Im Sockelbereich wird das Bauwerk zusätzlich durch Spritzwasser beansprucht. Hier kann je nach Beschaffenheit der Bodenoberfläche neben einer Durchfeuchtung durch

ablaufendes Regenwasser eine Verschmutzung durch gelöste Bodenpartikel eintreten. Sowohl Regenwasser als auch Spritzwasser können die Bauteile durch mitgeführte Salze schädigen.

Oftmals wird aus denkmalpflegerischen Gründen auf das Anbringen von Regenrinnen oder die Ausbildung ausreichend großer Dachüberstände verzichtet. Diese Objekte sind Feuchteeinwirkungen durch Regenwasser in besonderem Maße ausgesetzt.

Außenputze dienen nicht nur der Verbesserung des optischen Erscheinungsbildes einer Fassade, sie dienen ebenso dem Wetterschutz. Das Mauerwerk sowie die Fugen, werden durch den Putz vor dem Feuchteeintrag durch Regen- oder Spritzwasser geschützt. Maßgeblich ist hier das Erreichen einer Fugendichtigkeit. Daher ist es notwendig, den Zustand des Außenputzes regelmäßig zu kontrollieren und eventuelle Fehlstellen oder Risse auszubessern.

Die Verwendung von Gesteinsarten mit geringer Wasseraufnahmefähigkeit und hoher Wetterbeständigkeit insbesondere im Sockelbereich (Granit, Basalt, Feldstein) wirken dem Feuchte-, Schmutz- und Salzeintrag entgegen.

3.1.3 Leckagen

Unter Leckage wird die Beschädigung von wasserführenden Leitungen verstanden. Hierzu zählen Wasser- und Abwasserleitungen, Heizungsleitungen sowie Regen- und Fallrohre. Das hierbei austretende Wasser kann zu Schädigungen der Bausubstanz führen.
Um Feuchteschäden durch Leckagen entgegenzuwirken ist eine regelmäßige Kontrolle dieser Leitungen durchzuführen. Bei bereits eingetretenen Schäden muss die schadhafte Stelle - gegebenenfalls mit geeigneten Messgeräten (z.B. Thermografie) - aufgespürt und abgedichtet werden.

3.1.4 Von oben eindringende Feuchtigkeit

Feuchtigkeit von oben kann durch eine undichte Dachhaut in das Gebäude gelangen. Dies kann durch fehlende oder fehlerhafte Dacheindeckung bzw. -abdichtungen oder über Einpressung von Regenwasser durch Wind erfolgen. Ebenso kann Wasser von oben in das Bauwerk gelangen, wenn Regenrinnen oder Fallrohre durch Verschmutzung den freien Ablauf behindern. Feuchtigkeit sucht sich oftmals nicht einen direkten Weg im Sinne der Schwerkraft und erschwert somit die Ortung des Schadens. Regelmäßige Kontrollen sind zur Schadensvermeidung unabdingbar.

3.1.5 Kapillarer Feuchtetransport

Von kapillarem Feuchtetransport wird dann gesprochen, wenn in den kapillaren Poren der Baustoffe Wasser bzw. Feuchtigkeit entgegen der Schwerkraft nach oben steigt. Hierbei ist ein direkter Kontakt mit der Feuchtigkeit Voraussetzung. Wie viel Feuchtigkeit aufgenommen wird, wie hoch die Feuchtigkeit in der Wand steigt und wie schnell es zu einer Durchfeuchtung kommt, hängt im Wesentlichen von der Porengröße des Baustoffes ab. Allgemein gilt, dass größere Poren mehr Wasser transportieren können als kleinere. Im Porengrößenbereich zwischen 10^{-4} und 10^{-7} m ist die Kapillarität am stärksten ausgeprägt. Diese Poren werden deshalb auch als Kapillarporen bezeichnet[42].

Durch ständige Austrocknungs- und Durchfeuchtungsvorgänge entsteht zwischen der aufgenommenen und der abgegebenen Feuchtigkeitsmenge eine Art Ausgleichsfeuchte. Dies ist die stoffspezifische Feuchte eines porösen Baustoffes, die sich in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchtigkeit und im Gleichgewicht mit ihr befindet. Sie wird auch als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet.

Ermittelt wird die Ausgleichsfeuchte im Labor. Hier wird die Baustoffprobe einem Normklima von 20°C und 80% relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Die Dauer der Lagerung im Klimaschrank hat so lange zu erfolgen, bis die Masse der Probe (m) sich um nicht mehr als 0,1 %/Tag verändert. Die Bestimmung der Masse und der Trockenmasse geschieht mit der Darrmethode, bei der die Probe in einem Trockenschrank bei ca. 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wird und das Gewicht vor und nach der Trocknung durch Wiegen bestimmt wird[43].

Die Ausgleichsfeuchte berechnet sich nach folgender Formel:

Formel 3.1 $$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{m}_k - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100 \quad [\mathrm{Masse\%}]$$

A	Ausgleichsfeuchte	Masse%
m_k	Masse nach Klimalagerung	g
m_{tr}	Masse nach Trockenschranklagerung	g

Die Bestimmung der Ausgleichsfeuchte dient der Feststellung eines Minimalwertes, der nach Trockenlegungsmaßnahmen erreicht werden kann.

[42] Frössel 2011, S. 86.
[43] DIN EN ISO 12570:2013-09, S. 8.

Zudem kann das Verhältnis der Ausgleichsfeuchte (A) zum Feuchtegehalt (F) des Baustoffes Aufschluss darüber geben, ob es sich bei dem auftretenden Feuchteschaden um aufsteigende Feuchtigkeit oder hygroskopische Feuchtigkeit (durch Versalzung des Baustoffes) handelt.

Ist **A ≥ F** handelt es sich ausschließlich um hygroskopische Feuchtigkeit durch Versalzung des Baustoffes.
Wenn **A < F** ist, kann von aufsteigender Feuchtigkeit gesprochen werden. Dies gilt jedoch nur, wenn defekte Regenfallrohre oder Rohrleitungen bzw. Schäden durch Oberflächenkondensat nicht vorhanden sind[44].

Die Steighöhe der Feuchtigkeit durch den Mechanismus des kapillaren Feuchtetransports innerhalb einer Wand hängt von der Art des Baustoffes, dem Baustoffgefüge und dem verwendeten Mörtel ab. Einfluss darauf hat auch die Außen- und Innenbekleidung der Wand. Das heißt dem verwendeten Putz, dem Anstrich oder einer vorgesetzten Schale. So steigt beispielsweise die Feuchtigkeit bei einem Mauerwerk mit einem inneren Ölfarbanstrich oder einem äußeren Bitumenanstrich höher, da die Austrocknung des Baustoffes erst oberhalb dieser diffusionsdichten Beschichtungen erfolgen kann.

Nachfolgendes Schema verdeutlicht die Wasseraufnahme (Steighöhe) von Ziegelmauerwerk bei Kontakt mit Feuchtigkeit.

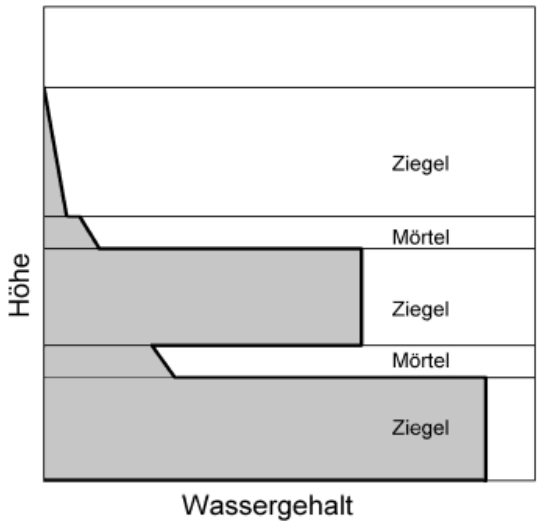


Abb. 3.1: Steighöhe der Feuchtigkeit[45]

Die geringe Steighöhe von 2 bis 3 Steinlagen resultiert aus den unterschiedlichen "Übergangswiderständen" zwischen Ziegel und Mörtel. Die Wasseraufnahme hängt vom Verhältnis der Saugspannungen der angrenzenden Stoffe und der Intensität des Kontakts ab. Die Steighöhe von Feuchtigkeit in 1 bis 2 Meter Höhe - ausschließlich bedingt durch aufsteigende Feuchtigkeit - ist daher unwahrscheinlich. Vielmehr führt das Vorhandensein von bauschädigenden Salzen zu solch hohen Steighöhen.

[44] Balak/Pech 2008, S. 111.
[45] Künzel 2007, S. 12.

Dieses Steigvermögen von Wasser beschreibt KÜNZEL unter anderem in "Bauphysik und Denkmalpflege"[46].

Zur Analyse, ob aufsteigende Feuchtigkeit für die auftretenden Bauschäden verantwortlich ist, werden folgende Faktoren herangezogen und kurz erläutert:

- Umgebungsvariable
- Grundwasserstand
- Schichtenaufbau des Bodens
- Gründungsart
- Gebäudespezifische Eigenschaften
- konstruktiver Wandaufbau
- Baustoffe
- eventuell vorhandene Abdichtungen
- Gebäudenutzung

Umgebungsvariable
Liegt das zu untersuchende Gebäude in einer Hanglage, kann es bei dichten Böden (z.B. Lehm, Ton) über Schichtenwasser zu Wassereintrag in die Bausubstanz kommen, da das Wasser nicht ungehindert abfließen kann. Auch die Lage an Bächen, Flüssen oder Seen lässt aufsteigende Feuchtigkeit erwarten.

Grundwasserstand
Ein erhöhter Grundwasserstand kann für aufsteigende Feuchtigkeit verantwortlich sein, wenn in der Vergangenheit keine horizontalen oder vertikalen Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Durch die Kapillaren ist es möglich, dass Feuchtigkeit in das Mauerwerk gelangt und nach oben steigt.

Schichtenaufbau des Bodens
Wasserführende Bodenschichten (z.B. Geschiebelehm) befördern Feuchtigkeit an das Bauwerk heran und verhindern das Versickern in den Baugrund. Bodengutachten oder Erkundungsgräben direkt neben dem Bauwerk geben Aufschluss über den Schichtenaufbau.

Gründungsart
Auch hier können durch einen Erkundungsgraben die Art des Fundamentes, der verwendeten Baustoffe und der Gründungsaufbau erforscht werden. Sind für die Gründung großformatige Feldsteine mit geringem Mörtelanteil zwischen den Steinen verwendet worden, so

[46] Künzel 2007, S. 10ff.

kann das Vorhandensein aufsteigender Feuchte über das Fundament in der Regel ausgeschlossen werden.

Gebäudespezifische Eigenschaften

Zu diesen Eigenschaften zählen Regenrinnen oder ausreichend große Dachüberstände, die die Ableitung des Wassers vom Bauwerk weg gewährleisten. Die Ausbildung einer Sockelzone aus feuchtigkeitsunempfindlichem Material wirkt dem Wassereintrag durch Spritzwasser entgegen. Zu diesen Materialien zählen beispielsweise Granit oder Basalt - zwei Gesteinsarten, die sich durch hohe Wetterbeständigkeit und geringe Wasseraufnahmefähigkeit auszeichnen.

Konstruktiver Wandaufbau

Sind bezüglich des Wandaufbaus keine Baupläne oder Aufzeichnungen vorhanden, so sollten Kernbohrungen den nötigen Aufschluss geben. Eine zerstörungsfreie Untersuchung durch optische Begutachtung kann keine endgültige Aussage über den Wandaufbau geben, da es sich beispielsweise bei einem nach außen ersichtlichen Ziegelmauerwerk durchaus nur um eine Verblendung handeln kann und im Inneren der Wand ein Kern aus Bruchsteinen oder Schutt die Grundlage bildet.

Baustoffe

Die Art der verwendeten Baustoffe, das Gefüge und die Art des Mörtels geben Auskunft über die kapillare Steigfähigkeit von Feuchtigkeit innerhalb des Mauerwerkes. Die Kennwerte (z.B. Porosität, Gleichgewichtsfeuchte, Bindemittel) dieser Baustoffgrößen können durch Probenentnahmen und Laborauswertungen ermittelt werden.

Abdichtungen

In der Vergangenheit wurden an vielen Bauwerken bereits Abdichtungen in horizontaler oder vertikaler Richtung vorgenommen. Diese können jedoch eine bauschädigende Wirkung hervorrufen, da das Austrocknungsverhalten der Baustoff gegebenenfalls erschwert wird. Auch "feuchtekaschierende" Maßnahmen wie Putze oder Anstriche sind bei der Bauschadensanalyse aufzunehmen und ggf. zu entfernen, um den Feuchteverlauf im Mauerwerk feststellen zu können.

Gebäudenutzung

Sowohl die Nutzung des Gebäudes in der Vergangenheit, als auch die derzeitige Nutzung geben Aufschluss über die Ursachen des Auftretens von Feuchtigkeit innerhalb des Bauwerkes. So weisen ehemalige Stallgebäude einen erhöhten Anteil an Salzen (i.d.R. Nitrate) im Mauerwerk auf. Die hygroskopische Wirkung von Salzen ist verantwortlich für das Steigverhalten von Feuchtigkeit innerhalb eines Baustoffgefüges (s. Kap. 3.1.5).

Eine große Besucherzahl ist für die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Rauminneren verantwortlich und damit auch für die Feuchteablagerungen an den Wänden und Einrichtungsgegenständen. Durch eine hohe Luftfeuchtigkeit reichert sich Feuchtigkeit in den Kapillaren an und führt unter Umständen zu aufsteigender Feuchtigkeit.

Das Vorhandensein eines oder mehrerer der dargestellten Faktoren (mit ihren negativen Auswirkungen) ist ein Indiz für aufsteigende Feuchtigkeit. Vor allem die Existenz von bauschädigenden Salzen im Baustoffgefüge hat einen entscheidenden Anteil an den auftretenden Feuchteschäden. Ist eine Bauwerksdiagnose mittels baustoffzerstörender Methoden aus denkmalpflegerischer Sicht nicht möglich, so kann mit nachfolgender tabellarischer Übersicht zunächst eine grobe Zuordnung getroffen werden.

Merkmale und Schadensbilder von Schäden durch aufsteigende Feuchtigkeit (s. auch Tabelle 3)

Feuchtehorizont bis ca. 50-100 cm; bei größerem Mörtelanteil oder diffusionsdichter Wandbekleidung auch darüber
Plötzlicher Übergang von "feucht" zu "trocken" in Höhe des Feuchtehorizonts
Biogener Befall (Moose, Algenbildung) durch erhöhte Baustofffeuchte
Reliefbildung durch eine Verschiebung des Verdunstungsbereichs von der Oberfläche zum Poreninneren
Kantenparalleles Abschalen und Risse durch Anreicherung von Wasser in den Fugen; bei Temperaturänderungen wird das Baustoffgefüge gelockert (auch Frostsprengung)
Aufblättern und Bröckeln durch Frosteinwirkung
Fleckenbildung; meist dunkler als übrige Bausubstanz

Feuchteprobleme durch aufsteigende Feuchtigkeit können durch Salzanreicherungen im Bauwerk noch verstärkt werden. So können beispielsweise Moose durch die im Baustoff enthaltenen Salze notwendige Nährstoffe beziehen. Ihr Wachstum wird somit gefördert.

Die meisten der dargestellten Merkmale und Schadensbilder sind demnach nicht ausschließlich aufsteigender Feuchte zuzuordnen. Vielmehr bedarf es immer einer Baustoffanalyse, um eine bauschädigende Wirkung durch Salze auszuschließen und die Feuchteprobleme allein der aufsteigenden Feuchte zuzurechnen. Die Feststellung über das Vorliegen der bereits genannten Faktoren ist für diese Analysen hilfreich.

3.2 Wasseraufnahme in gasförmiger Form

Da Feuchtigkeit in gasförmiger Form an das Vorhandensein von Wasser in flüssiger Form gebunden ist, kann eine strenge Differenzierung der Wasseraufnahmemechanismen nicht erfolgen. Im Folgenden werden Vorgänge beschrieben, die einerseits bei der Verdunstung von flüssigem Wasser vorkommen und andererseits dem Vorliegen von Wasser in gasförmiger Form zuzuschreiben sind.

3.2.1 Windeinpressung feuchter Luft

Bei der Windeinpressung spielt zunächst der Feuchtigkeitseintrag über flüssiges Wasser eine Rolle. In seiner gasförmigen Form kann Feuchtigkeit durch Wind dann eindringen, wenn nicht dampfdichte - jedoch wasserdichte - Folien für die "Abdichtungen" beispielsweise eines Daches verwendet wurden.

3.2.2 Nutzungsfeuchte

Unter der Nutzungsfeuchte bei historischen Bauwerken wird in erster Linie der Feuchteeintrag durch Besucher des Gebäudes verstanden. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben, führen hohe Benutzerzahlen zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. Ein sitzender Mensch gibt in der Stunde ca. 35 g[47] Wasserdampf an die Umgebungsluft ab. Diese Wasserdampfabgabe ist beispielsweise bei Gottesdiensten auf Grund von kirchlichen Feiertagen (Weihnachten, Ostern) bedeutsam. Hier sei auf die Kirche in Fahrland verwiesen, bei der zu den weihnachtlichen Gottesdiensten Kondensation auf Grund der hohen Besucherzahlen aufgetreten ist (s. Band 2 - Kirche Fahrland).

Durch die Lufterwärmung in den Bereichen, in denen sich die Kirchenbesucher aufhalten - also hauptsächlich im Bereich der Sitzbankreihen - erfährt die Luft einen thermischen Auftrieb[48]. Durch den Wärmeübertragungsvorgang der Konvektion wird diese warme Raumluft an die kalten Bauteiloberflächen herangetragen und kann bei Vorliegen entsprechend kalter Oberflächentemperatur zur Kondensation durch eine Taupunktunterschreitung führen.
Jedoch wird von KÜNZEL beschrieben, dass der Einfluss durch die Feuchteabgabe der Nutzer auf die Erhöhung der Luftfeuchte bei Räumen mit großem Volumen einen geringen Einfluss hat[49]. Steht demnach mehr Absorptionsfläche durch die, den Raum umgebenden und

[47] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 127.
[48] Pfeil 1975, S. 30.
[49] Künzel 2007, S. 69.

im Raum vorhandenen, Flächen entgegen, wird sich der Einfluss der Nutzer auf das Auftreten von Kondensation verringern.

3.2.3 Kondensation und Kapillarkondensation

Tauwasser bzw. Kondensatbildung tritt im Allgemeinen im Winter auf (s. Kap. 2.1). Hier trifft warm-feuchte Raumluft (z.B. durch schnelles Aufheizen) auf kalte Bauteilflächen. Diese Bauteile sind hauptsächlich dünne oder ungedämmte Wände, ausgemauerte Fachwerkkonstruktionen oder Natursteinwände aus gut wärmeleitenden Baustoffen.

Dagegen ist im Frühsommer der hohe Wasserdampfgehalt der warmen Außenluft für die Bildung von Kondensat verantwortlich. Die über den Winter abgekühlten Bauteilflächen der zumeist dicken Mauern von Kellern, Kirchen- oder Burgmauern verhindern durch ihre Masse eine schnelle Erwärmung. Ursache hierfür ist die hohe Wärmespeicherfähigkeit der großen Bauteilmassen, die bis in die Sommermonate ihre tiefen Temperaturen halten können. Zudem ist es in diesen Gebäuden im Winter wärmer und im Sommer kühler als im Außenbereich. Das Raumklima wird in unbeheizten Gebäuden hauptsächlich vom Außenklima bestimmt, wenn diese nicht beheizt oder temperiert werden. Infolgedessen entstehen Feuchte- und Temperaturdifferenzen, deren Folge das Auftreten von Tauwasser ist. Folgende beeinflussende Faktoren sind in Bezug auf die Winter-, Sommer- und Kapillarkondensation zu beachten:

Lage des Gebäudes
Bauteile an der Nordseite eines Gebäudes bedeuten eine geringere Erwärmung der Bauteiloberfläche, da durch den fehlenden Sonneneintrag keine Erwärmung stattfinden kann. Bei Gebäudeteilen mit Südausrichtung kann durch die intensive Sonneneinstrahlung eine schnellere Erwärmung der Bauteiloberfläche und damit eine raschere Wärmedurchdringung der Wand erfolgen. Wände in Südausrichtung sind i.d.R. nicht so anfällig für Schäden durch Sommerkondensation wie Wände in Nordlage, da diese naturgemäß kühler sind.

Hauptwindrichtung
Durch Windeintrag werden feuchte Wände stärker abgekühlt als trockene Wände. Die Abkühlleistung des Windes überwiegt bei feuchten Wänden zu seiner Trockenleistung. Da Feuchte das Bestreben hat zum Ort des geringeren Wasserdampfdruckes (i.d.R. ins Freie aber u.U. auch in das Innere eines Gebäudes) zu diffundieren, ist die Bauteiloberfläche bis zum Erreichen ihrer Ausgleichsfeuchte stets feucht und daher anfällig für die Abkühlung durch Wind.

Außentemperaturen

Höhere Außenlufttemperaturen erwärmen Bauteile schneller und vermindern die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sommerkondensation. Je länger die hohen Außentemperaturen in den Frühsommermonaten anhalten, umso zügiger findet der Wärmetransport in den Bauteilen statt; die innere Bauteiloberfläche kann sich erwärmen. Die Oberflächentemperatur dieser Bauteile und der Abstand zur Taupunkttemperatur erhöhen sich. Durch die hohe Wärmespeicherfähigkeit dicker Außenwände steigt auch die Innentemperatur, da diese ihre Wärme an die Raumluft abgeben.

Luftfeuchtigkeit

In Abhängigkeit von der Temperatur kann Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Luft mit höherer relativer Luftfeuchtigkeit erreicht schneller ihren Sättigungspunkt, die Folge ist Kondensation. Wird also warm-feuchte Außenluft durch Lüften in das Gebäude gebracht, erhöht sich auch im Inneren eines Gebäudes die relative Luftfeuchtigkeit. Diese hat die Möglichkeit, sich an kalten Bauteiloberflächen als Kondensat niederzuschlagen.

Oberflächentemperatur

Je geringer die Oberflächentemperatur von Wänden, Decken und Fußböden ist, desto exponierter sind diese für eine Bildung von Tauwasser. Die Bauteile sind durch die kalten Wintermonate ausgekühlt und erwärmen sich nur langsam. Eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur ist die Folge; Sommerkondensation tritt auf.

Salzgehalt der Baumaterialien

Salze wirken hygroskopisch. Demzufolge sind salzbelastete Bauteiloberflächen meist feuchter als "salzfreie" Bauteile. Wenn die Sättigungsgrenze des Baustoffes erreicht ist, kann dieser durch das eingelagerte Wasser keine kondensationsbedingte Feuchte mehr absorbieren.

Nutzungsspezifische Faktoren (Heizung, Lüftung, Nutzungsart)

Wird ein Gebäude nicht oder nur zeitweise beheizt (z.B. bei Veranstaltungen), erwärmt sich die Bauteiloberfläche nur langsam. Nicht abgestimmte Heizungsarten können negativen Einfluss auf das Raumklima haben. Vor, während und nach einer Veranstaltung werden historische Gebäude häufig - wenn auch nur kurz - gelüftet. Hierzu zählt auch der Luftaustausch über die Eingangstüren der Kirche, die während des Einlasses von Besuchern geöffnet werden bzw. während der Gottesdienste geöffnet bleiben. Hier wird warm-feuchte Außenluft hereingelüftet, ohne dass dies den Verantwortlichen bewusst ist.

Baukonstruktive Faktoren

Ausreichende Wärmedämmung und Baumaterialien, welche Feuchtigkeit absorbieren können, verhindern bzw. vermindern die durch Tauwasseranfall entstehenden Schäden an der

Bausubstanz und dem Inventar. Durch die vielfach in historischer Bausubstanz vorkommenden Einfachverglasungen der Fenster findet - bedingt durch die hohe Fugendurchlässigkeit der Fensterkonstruktion - ein hoher Luftwechsel statt. Hierdurch erhöht sich die Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation.

Die Lage des Gebäudes, die Hauptwindrichtung und die Außentemperaturen sind statisch, das heißt, sie können nicht verändert werden. Mit geeigneten Maßnahmen können die weiteren Faktoren so beeinflusst werden, dass kein Tauwasser anfällt.

Merkmale und Schadensbilder von Schäden durch Kondensation (s. auch Tabelle 3)

Auftreten von Kondensat meist im unteren Bauteilbereich und in Gebäudeecken (kühle Bauteiloberflächen); ggf. kann die gesamte Raumschale betroffen sein
Gradueller Übergang von feuchten zu trockenen Flächen
Abplatzungen durch Frostsprengung feuchter Bauteile (Putz)
Schimmelflecken oder Bildung von Moosen und Flechten in Außenecken und im unteren Bauteilbereich von Innenräumen

3.2.4 Adsorption und Absorption der Luftfeuchtigkeit

Bei der Adsorption lagert sich die Feuchtigkeit an festen Materialien an. Die Bindung erfolgt allein durch Oberflächenhaftung und führt nicht zu einer Feuchteanreicherung in den Baustoffen […]. Bei Stoffen mit einer porösen Kapillarstruktur kann die Adsorption auch an den inneren Oberflächen erfolgen[50]. Ohne mitwirkende Feuchtequellen richtet die Adsorption kaum größere Schäden an[51]. Sie kann jedoch für das Entstehen von Schimmelpilzen verantwortlich sein.

Bei der Absorption wird Feuchtigkeit aus der Raumluft im Inneren eines Baustoffes "eingelagert". Dieser Vorgang erfolgt durch die Adsorption in Zusammenhang mit der Kapillarkondensation (s. Kap. 2.1).

3.2.5 Hygroskopisch bedingte Feuchtigkeit

Unter hygroskopischer bedingter Feuchte wird im Allgemeinen die Wasseraufnahme eines Baustoffes durch eingelagerte Salze verstanden. Salze sind Umsetzungsprodukte von Säuren und Basen (aber auch: von Säuren und Metalloxiden). Diese reagieren unter Bildung von Salzen und Wasser miteinander und können dadurch eine bauschädigende Wirkung

[50] Bogusch/Duzia 2012, S. 155.
[51] Balak/Pech 2008, S. 12.

auslösen. Der Feuchteaufnahmeprozess wird als Sorption bezeichnet und beinhaltet, dass mineralische Baustoffe ein Feuchtegleichgewicht mit ihrer Umgebung erreichen. Dieser Vorgang ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Salzgehalt der Baustoffe. Je nachdem welche Salze (Chloride, Nitrate und Sulfate) in welcher Konzentration vorhanden sind, wird die Hygroskopizität der Baustoffe bestimmt. Die Ausgleichsfeuchte des Baustoffes hängt also auch von seinem Salzgehalt ab. Durch welche Mechanismen und Vorgänge Salze in die Bauteile gelangen können wird im Folgenden kurz beschrieben[52].

Umwelteinflüsse

Im Regenwasser enthaltende Anteile von Schwefel- oder Stickstoffoxiden (aus Verbrennungsprozessen von Fabriken und Kraftfahrzeugen) lösen eine Reaktion mit dem alkalischen Bindemittel aus. Es kommt unter Freisetzung von Wasser zur Salzbildung.

Baustoffeigene Salze

Natursteine, keramische Materialien und Ziegelsteine können erhebliche Mengen an bauschädigenden Salzen enthalten, die in diesen Produkten teilweise bereits durch den Herstellungsprozess entstehen. Ebenso können größere Mengen an Salzen in Bindemitteln (z.B. hydraulische Stoffe wie Trasskalk) vorkommen. Ferner kann "salzhaltiges" Anmachwasser für Mörtel eine Ursache sein.

Belastungen durch das Erdreich

Im Baugrund vorhandene Salze sind in der näheren Umgebung eines Gebäudes durch die übermäßige Düngung von Böden oder Nähe zu landwirtschaftlichen Betrieben bedingt. Ebenso können undichte Abwasserrohre oder die Salzstreuung im Winter durch den damit erfolgenden Salzeintrag Bauschäden verursachen.

Falsche Sanierungsmaßnahmen

Bei der Sanierung historischer Bausubstanz müssen oftmals die historischen Baustoffe mit "neuzeitlichen" Baustoffen kombiniert werden. Sind diese nicht kompatibel, kann die Auswirkung des entstehenden Sekundärschadens gravierender sein als der ursprünglich entstandene Primärschaden.

Eingedrungene Salze im Baustoff können durch die Kapillarporen über den gesamten Wandquerschnitt verteilt sein. Die Phänomene der aufsteigenden Feuchtigkeit können durch den Salzgehalt des Baustoffes verstärkt werden. Das heißt, dass der Baustoff durch die Salze noch mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann und die Hygroskopizität der Baustoffe

[52] Im Übrigen wird auf die zahlreiche einschlägige Fachliteratur zu diesem Themenbereich verwiesen.

erhöht wird. Die bauschädigende Wirkung von Salzen ist auf folgende Eigenschaften zurückzuführen[53]:

Löslichkeit

Bauschädigende Salze können auf Grund ihrer Löslichkeit in Wasser in den Kapillaren des Baustoffes nach oben steigen und sich verteilen. Je nach Löslichkeit des Salzes wird die Feuchtigkeit im Baustoff länger gehalten. Die Löslichkeit von Salzen hängt von der Art des Salzes und der Temperatur ab. Beispielsweise lösen sich in kalten Wasser 266 g/100 ml Calciumnitrat (Salpeter), bei warmen Wasser sind dies 660 g/100 ml[54].

Kristallisationsdruck

Die in den Kapillaren befindlichen Salze vergrößern beim Übergang von der gelösten Form in die kristalline Form ihr Volumen und üben einen hydrostatischen Druck auf die Porenwände aus. Wie hoch dieser Druck ist, hängt von der Temperatur und dem Grad der Salzsättigung in den Poren ab. Wiederholt sich der Prozess der Kristallisation und des "in Lösung gehen" des Salzes häufig, so führt dies zu einer Zerstörung des Baustoffes (Salzsprengung). Als Beispiel sei hier die Bildung von Epsomit (Magnesiumsulfat - $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) genannt. Die Volumenvergrößerung beträgt hier 430%[55].

Hydratationsdruck

Das Volumen der Salze wird innerhalb bestimmter Temperaturbereiche und entsprechender relativer Luftfeuchtigkeit vergrößert. Diese Volumenvergrößerung erfolgt durch Einlagerung von Wasser in das Kristallgitter der Salze. Der hierbei entstehende Hydratationsdruck führt mit seiner Sprengwirkung zur Zerstörung des Baustoffes.

Hygroskopizität

Hierunter wird die Fähigkeit eines Baustoffes verstanden, in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte Wasser zu binden. Die Gleichgewichtsfeuchte eines Baustoffes kann durch Salze wesentlich erhöht werden, wodurch die Feuchtigkeit im Bauwerk über die Grenzen der "aufsteigenden Feuchtigkeit" nach oben steigen kann.

Osmose

Salze sind bestrebt, einen Konzentrationsausgleich zu schaffen. Das heißt, sie streben von Orten höherer Konzentration zu Orten niedriger Konzentration. Diese Eigenschaft ist Ursache für den Salztransport innerhalb eines Baustoffgefüges und somit für den Feuchtetransport verantwortlich.

[53] vgl. Arendt/Seele 2001, S. 15.
[54] Frössel 2011, S. 111.
[55] Arendt/Seele 2001, S. 15.

Nachfolgend sind salzbedingte Schadensbilder aufgeführt. Durch einen Vergleich mit in der Praxis auftretenden Schäden kann festgestellt werden, ob die Durchführung einer Salzanalyse notwendig wird.

Merkmale und Schadensbilder von Schäden durch hygroskopisch bedingte Feuchtigkeit

(s. auch Tabelle 3)

Feuchtehorizont stellt sich auch oberhalb von einem Meter ein
Feuchte Stellen auf der Wandoberfläche, die sich bei hoher Luftfeuchtigkeit vergrößern und bei niedriger Luftfeuchtigkeit kleiner werden
Salzausblühungen (auch in Verbindung mit aufsteigender Feuchte)
Krustenbildung durch Anlagerungen von Schmutzpartikeln, die durch chemische Reaktion mit Wasser und/oder dem Baustoff Salze bilden können
Absanden durch Auflösung des Bindemittels durch Salze und Wasser
Flächiges Abschalen durch Salzanreicherung und Verlagerung der Verdunstungszone ins Innere des Baustoffes
Kantenparallele Schalen und Risse durch Anreicherung von Wasser in den Fugen - mit Temperaturänderungen wird das Baustoffgefüge gelockert (auch Frostsprengung)
Aufblättern und Bröckeln durch Salzsprengung
Blasenbildung durch Auskristallisation von Salzen
Biogener Befall (Salze dienen als "Nahrungsgrundlage")

Ob und welche Salze in einem Bauwerk bzw. den Baustoffen vorhanden sind, kann ausschließlich durch eine Probenentnahme geklärt werden (s. Kap. 5.2.3).

3.3 Zusammenfassung Feuchteschäden

Die Schadensbilder von Sommerkondensation, aufsteigender Feuchte und hygroskopischer Feuchte sind sich zum Teil ähnlich. Dieser Umstand erfordert eine qualifizierte Feststellung des Schadensbildes und eine darauf abgestellte differenzierte Schadensprophylaxe. In folgender Tabelle sind Unterscheidungsmerkmale dieser Schadensursachen aufgeführt.

Da es sich bei den in Kirchen verwendeten Baustoffe in erster Linie um mineralische Baustoffe handelt, beschränkt sich diese Aufstellung auf diese. Durch ähnliche Erscheinungsbilder von Feuchteschäden, die auf einer Sommerkondensation oder Winterkondensation beruhen, wird hier der allgemeine Begriff der Kondensation verwendet.

Tabelle 3: Merkmale von Kondensation, aufsteigender und hygroskopischer Feuchte

Merkmal	Kondensation	aufsteigende Feuchte	hygroskopische Feuchte
Feuchtehorizont	Raumschale*	0,5 bis ca. 1 m	auch > 1 m
Übergang feucht-trocken	fließend	eindeutig	fließend
Tauwasserbildung	ja	nein	nein
Absanden	nein	nein	ja
Abschalen	nein	ja	ja
Abplatzungen	ja	ja	ja
Aufblättern/Bröckeln	möglich	ja	ja
Ausblühungen	nein**	nein**	ja
Biogener Befall	möglich	möglich	möglich
Verfärbungen	möglich	ja	ja
Krusten	nein	nein	ja
Reliefbildung	nein	ja	nein
Risse	ja	ja	ja

* abhängig von der Oberflächentemperatur

** abhängig vom Feuchteeintrag

Diese Aufstellung dient der visuellen Schadensaufnahme am Bauwerk und kann erste Hinweise auf weiterführende Untersuchungen geben.

Die in diesem Kapitel angesprochenen Schäden dienen der Abgrenzung der Feuchteschäden "Aufsteigende Feuchte" und "Hygroskopische Feuchte" zum Schadensphänomen der Sommerkondensation. Diese Abgrenzung und die zu erfolgenden Untersuchungen können der nachstehenden Abbildung entnommen werden.

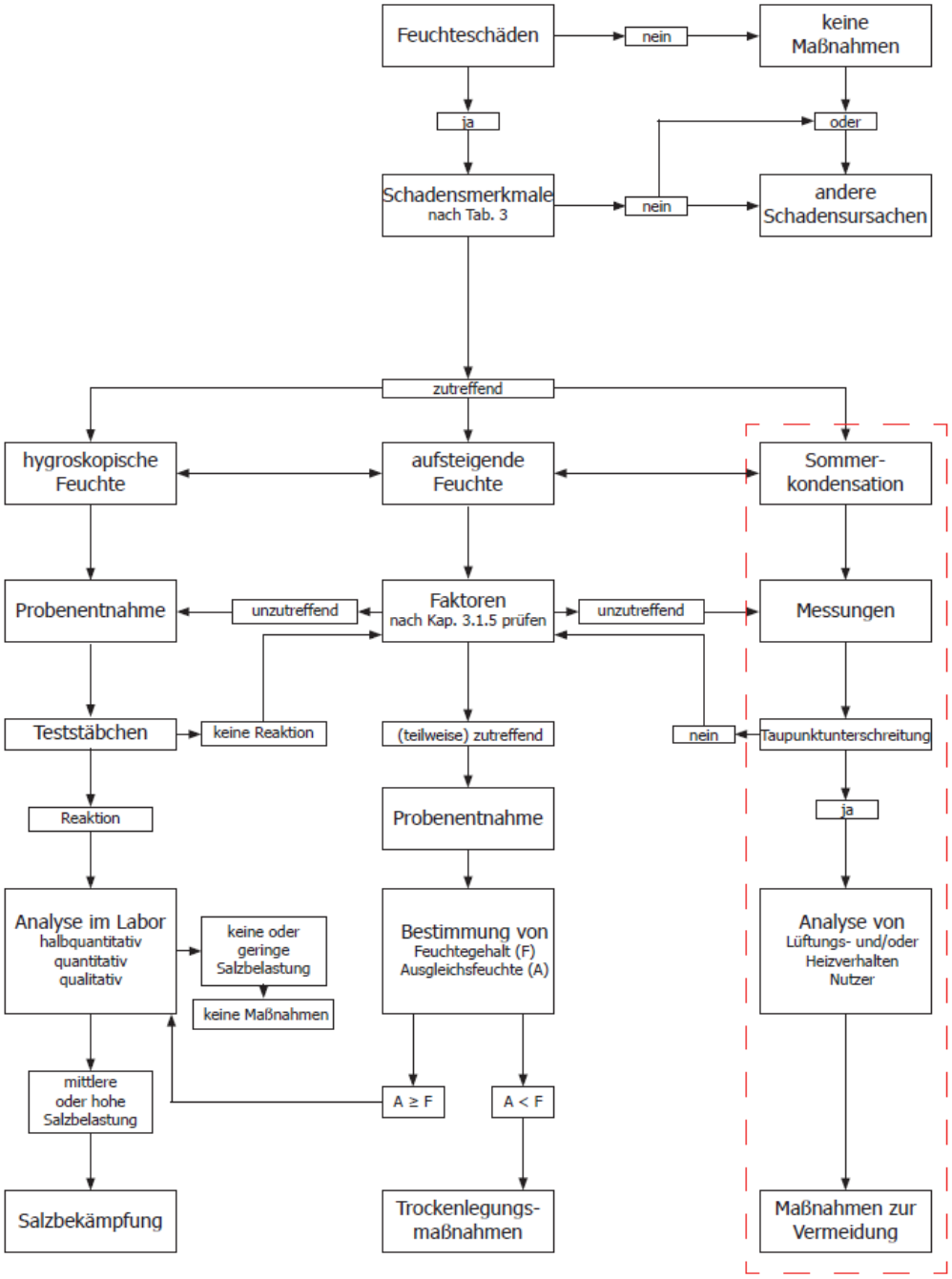


Abb. 3.2: Ablaufdiagramm zur Feststellung der Art der Feuchteschäden[56]

Nach der Abgrenzung der Feuchtephänomene aufsteigende Feuchtigkeit und hygroskopische Salze gegen über der Sommerkondensation wird dem Themenbereich der Schadenspotenziale durch Kondensation das folgende Kapitel gewidmet. Hierbei wird insbesondere darauf eingegangen, welche Mängel und Schäden durch Sommerkondensation an den unterschiedlichen Bauteilen entstehen können.

[56] Schrimpf 2005, S. 66. Es erfolgte eine Überarbeitung der Kapitelnummern und Tabellenangaben.

4 Auswirkungen infolge Kondensation

Das Auftreten von Sommerkondensation in historischer Bausubstanz hat nicht nur feuchte und damit schadensanfällige Bauteiloberflächen zur Folge, sondern auch eine Vielzahl von weiteren stofflichen Veränderungen an der Raumschale und den Einrichtungsgegenständen. Hierfür werden einige Beispiele aufgezeigt.

4.1 Auswirkungen auf die Raumschale

Unter Raumschale werden die raumumfassenden Bauteile Wände, Decke und Boden verstanden. Die Auswirkungen der Sommerkondensation auf das Mauerwerk, den Putz und die darauf angebrachten Raumfassungen sind von besonderer Bedeutung, da eine Beeinträchtigung der Bausubstanz durch Feuchtigkeit Mängel und Schäden an diesen Materialien verursachen kann.

Mauerwerk

Die Durchfeuchtung einer Mauerwerkswand bedingt auch immer eine Herabsetzung ihrer wärmedämmenden Eigenschaft.[57] Ein zunehmender Feuchtgehalt erhöht die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Stoffes und führt zu einer Veränderung der Wärmedämmeigenschaft.

Durch die erhöhte Feuchtigkeit können im Mauerwerk vorhandene Salze an den Porenninnenwänden durch Ionenmigration transportiert werden[58], sich im Baustoff anreichern und in der Verdunstungszone zu einer Salzsprengung führen.

Auch Algen und Pilze vermehren sich bei Zufuhr von Feuchtigkeit verstärkt. Schimmelpilze sind ein Hinweis auf Wasser, beispielsweise durch Kondensation, im Mauerwerk[59].

Treten häufig Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit oder Frost-Tau-Wechsel auf, so führt ein lösender und treibender Angriff des Bindemittels zu einer Gefügezerstörung. Abplatzungen, Absandungen und weitere Beeinträchtigungen der Steinstruktur sind die Folge. Das wiederholte Auftreten von Kondensation kann daher bis zu einem Verlust des Tragverhaltens führen.

Putz

Putze sind Stoffgemische aus Bindemitteln und Zuschlägen. Ihre Unterscheidung erfolgt

[57] Krischer/Kast 1978, S. 274ff.
[58] Goretzki 2012, S. 98f.
[59] Frank/Schuhmann 1998, S. 22.

nach der Art des Bindemittels: z.B. Kalkzementputz, Gipsputz, Trasskalkputz. Die verschiedenen Bindemittel reagieren unter Einfluss von Feuchtigkeit unterschiedlich. Durch Schwind- und Quellvorgänge kommt es zu einer Volumenänderung und damit zur Zerstörung der Stoffstruktur. Bei Frost- und Tauwechseln in unbeheizter Bausubstanz oder bei großen Klimaschwankungen in beheizten Räumen sind Rissbildungen oder auch Substanzverluste an den Oberflächen die Folge. Abhängig von der Haftung des Putzes auf dem Untergrund kann es zur Bildung von Hohlstellen und zur Ablösung der Putzoberfläche (Abplatzungen) kommen[60].

Raumfassungen

Neben der Kondensation sind Temperaturschwankungen und hohe Luftfeuchtigkeiten verantwortlich für den Substanzverlust der Mal- und Farbschichten. Die Raumfassungen werden rissig, blättern auf oder lösen sich ab. Je nach Löslichkeit des verwendeten Bindemittels und der Pigmente sind erhebliche Beeinträchtigungen in der Farbigkeit und Farbintensität der Raumfassung die Folge. Bedingt wird dieser durch die Versprödung oder der Bindemittelumwandlung aufgrund von Alterung[61].

Wandmalereien werden insbesondere dann stark beansprucht, wenn auch rückseitig im Malgrund eine hohe Feuchtelast vorherrscht[62]. Dies bedeutet, dass die Feuchtebelastung einer Wand Auswirkungen auf die Beständigkeit einer Wandmalerei hat.
Gleiches gilt für die im Malgrund vorhandenen Salze. Durch die, mit dem Phasenwechsel verbundenen, Volumenänderungen geht eine hohe Beanspruchung der oberflächennahen Malschichten einher, die meist eine rasche Schädigung der Malerei zur Folge haben[63].

4.2 Auswirkungen auf Einrichtungsgegenstände

Als Einrichtungsgegenstände werden hier bewegliche Objekte verstanden, die aus liturgischen Gründen Bestandteil einer Kirche sind oder diese "schmücken" sollen.

Gemälde

Gerahmte wie ungerahmte Gemälde bestehen aus Materialien, welche unter Einfluss von Feuchtigkeit mit unterschiedlichem Quellverhalten reagieren. Schwankungen der Luftfeuchtigkeit führen somit zwingend zu unterschiedlichen inneren Spannungen. Eine Über-

[60] Arnold 2009, S. 35.
[61] DIN EN ISO 4618:2015-01, Punkt 2.11: Alterung: mit der Zeit eintretende nicht umkehrbare Veränderung einer oder mehrerer Eigenschaften einer Beschichtung
[62] Garrecht u.a. 2015, S. 46.
[63] Garrecht u.a. 2015, S. 46f.

schreitung der maximal möglichen Spannungen führt zu Craquelé oder Malschichtablösungen. Ob und wann Auswirkungen durch Kondensation bei Gemälden auftreten, hängt unter anderem

- vom Malgrund (z.B. Leinwand, Holz),
- der Haftung der einzelnen Malschichten untereinander,
- dem verwendeten Bindemittel für Pigmente (z.B. Leim, Öl)
- und der relativen Luftfeuchtigkeit

ab.

Die ideale relative Luftfeuchtigkeit für Gemälde wird im Bereich von 50% rH $\pm$ 15% rH[64] angegeben.

Gegenstände aus Holz

Gegenstände aus Holz sind in historischen Bauwerken, vornehmlich in Kirchen, zahlreich vorhanden. Dabei handelt es sich typischerweise um:

- Altäre
- Kanzeln
- Lettner
- Emporen
- Beichtstühle
- Tafelbilder
- Traggestelle für Tauf- und Weihbecken
- Chorgestühl
- Kirchenbänke
- Wandverkleidungen

Formänderungen des Holzes in Folge von Luftfeuchteänderungen bezeichnet man als Schwinden (Volumenverringerung) und Quellen (Volumenvergrößerung). Bei steigender relativer Luftfeuchte quillt Holz auf Grund seiner Struktur nicht gleichmäßig. Im Bereich bis 40% rH (trocken) und ab einer relativen Luftfeuchte von 60% (feucht) quillt Holz stärker als im mittleren Bereich (40-60% rH). Die Volumenänderung von Holz ist direkt proportional zum Wassergehalt des Holzes, nicht aber zur relativen Luftfeuchtigkeit[65].

Bei Auftreten von Kondensat nimmt Holz in höherer Menge Feuchtigkeit auf und quillt daher. Zu einer Schädigung des Holzes und der angrenzenden Baustoffe kann es dann kommen, wenn sich das Holz nicht spannungsfrei ausdehnen kann.

Auch die verwendeten Materialien zur Holzverbindung wie Verkittung, Verleimung, Holz-

[64] Erhardt/Mecklenburg 1994, S. 36.
[65] Erhardt/Mecklenburg 1994, S. 36.

oder Eisennägel können durch Kondensation geschädigt werden. Verkittungen und Verleimungen lösen sich, eisenhaltige Bestandteile korrodieren und führen zu gegebenenfalls Rostsprengungen.

Mängel und Schäden, die durch Kondensationsprobleme bei Holzgegenständen auftreten, reichen von Rissbildungen bis hin zur Bruchbildung bei Überschreitung der Grenzspannung nach einer plastischen Verformung.

Gegenstände aus Naturstein

Für Einrichtungsgegenstände aus Natursteinen wie beispielsweise

- Taufsteine
- Altäre
- Grabsteine bzw. -platten
- Skulpturen
- Lesepulte

gelten die gleichen Wirkzusammenhänge, die unter 4.1 aufgeführt sind, da es sich hierbei ebenfalls um mineralische Baustoffe handelt.

Gegenstände aus Metall

Metalle, wie Eisen, Bronze, Kupfer, Messing, Silber, Gold oder Zinn, finden sich in alten Bauwerken als

- Beschläge für Türen und Fenster (Eisen, Bronze, Silber, Messing)
- Tür- und Fensterrahmen (Eisen)
- Tauf- und Weihbecken (Bronze, Silber, Kupfer)
- rituelle Gegenstände (Gold, Silber, Bronze, Kupfer, Zinn)
- baukonstruktive Einbauten (Absperrungen aus Messing oder Eisenträger)

wieder.

Eisen verhält sich gegenüber Kondensation und hoher Luftfeuchtigkeit empfindlich - es neigt in Verbindung mit Feuchtigkeit zur Korrosion. Durch das Rosten des Eisens verändert sich seine chemische Zusammensetzung und sein Gefüge. Die äußere Schicht bildet Blasen oder blättert ab. Bei Eisenträgern wird das statische Tragverhalten durch diesen Substanzverlust negativ beeinflusst.

Kupfer und Kupferlegierungen wie Bronze oder Messing oxidieren durch Feuchtigkeitseinfluss und bilden eine dünne Oxidationsschicht auf ihrer Oberfläche aus. Gold und Silber sind relativ unempfindlich gegenüber Kondensationsfeuchtigkeit. Das Gleiche gilt für Zinn. Hier darf die Umgebungstemperatur jedoch nicht unter 13,2°C sinken, da sonst durch die so genannte "Zinnpest" ein Zerfall des Gegenstands eintritt[66].

[66] Neroth/Vollenschaar 2011, S. 728.

Orgel

Orgeln bestehen in der Regel aus einer Kombination unterschiedlicher Materialien (Metalle bzw. Metalllegierungen oder Holz), die für Pfeifenwerk, Windwerk und Regierwerk verwendet werden. Diese Materialien reagieren auf Feuchtigkeit unterschiedlich. Dies hat bei hohen Temperatur- und Feuchteschwankungen eine Verstimmung des Orgelwerks zur Folge.

Wie aus den Ausführungen in diesem Kapitel deutlich wird, können schädliche Auswirkungen durch Sommerkondensation auf die Raumschale und die Einrichtungsgegenstände durch eine Regulierung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte vermieden werden. Dies wird durch gezieltes Lüften oder eine Temperierung erreicht (s. Kap. 8).

5 Darstellung der Messmethoden und Untersuchungen

In diesem Kapitel wird auf die in den Dorfkirchen erfolgten bauphysikalischen Messungen sowie auf die im Labor durchgeführten Untersuchungen eingegangen. Die angewandten Messmethoden werden detailliert erläutert und in Kapitel 5.3 zusammengefasst. Es werden Hinweise auf unbedingt erforderliche und ergänzende Messungen gegeben, die eine Abgrenzung zu anderen Feuchteschäden ermöglichen.

Ausgehend von nachstehendem Untersuchungsschema wurden die ab Kapitel 5.1 beschriebenen bauphysikalischen Messungen bzw. Berechnungen und Ermittlungen durchgeführt.

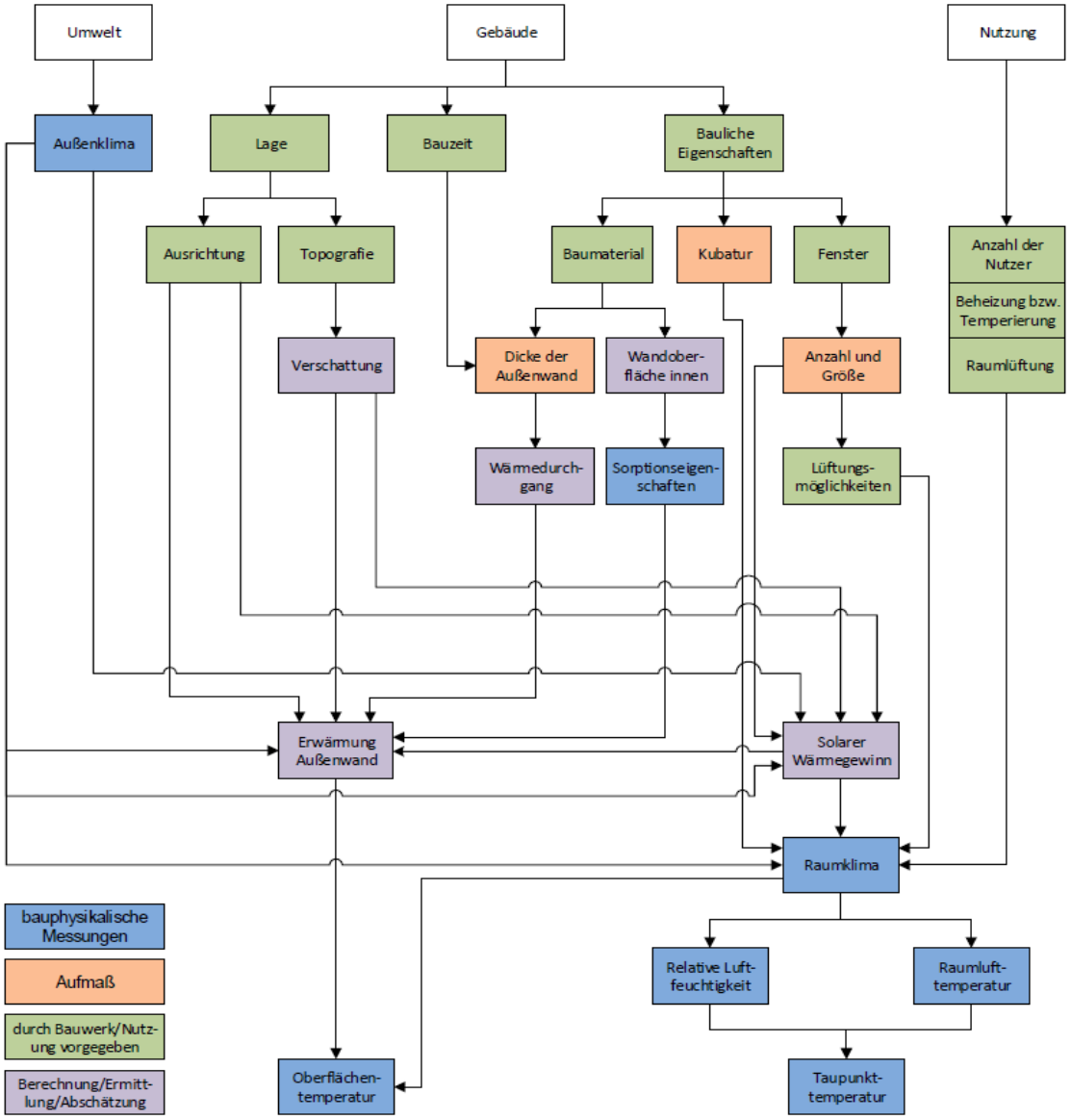


Abb. 5.1: Einflüsse und Abhängigkeiten für das Auftreten von Sommerkondensation

5.1 Messungen in den Kirchen

Um das Phänomen Sommerkondensation als Ursache für Bauschäden zu verifizieren, sind längerfristige Messungen notwendig. Diese sollten über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr erfolgen, um die klimatischen Verhältnisse der einzelnen Jahreszeiten messtechnisch erfassen und auswerten zu können.

Die Aufzeichnung der Messwerte durch Datenlogger erfolgte am Ort, die Auswertung der Ergebnisse am Arbeitsplatz. Je nach Anzahl der Messpunkte, der Messzyklen und der Speicherkapazität des Datenloggers kann das Auslesen in unterschiedlichen Zyklen erfolgen. Sinnvoll ist ein Rhythmus von ca. vier Wochen. So können im gesamten Messzeitraum bei Bedarf Zwischenergebnisse ausgewertet und Fehlfunktionen schnell erkannt und beseitigt werden.

Empfehlenswert ist es, die aufgezeichneten Daten des Datenloggers in ein Tabellenkalkulationsprogramm einzulesen und dort weiter zu bearbeiten. Hierbei können Berechnungsformeln zur Taupunktberechnung und -überschreitung erstellt werden. Die tabellarische Darstellung ermöglicht einen schnellen Überblick darüber, ob Kondensat aufgetreten ist und sie kann für ergänzende Auswertungen weiterverwendet werden.

Anhand von Grafiken werden die Auswirkungen von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte auf die Taupunkttemperatur übersichtlich dargestellt. Um die bauphysikalischen Zusammenhänge des Auftretens von Sommerkondensation ausreichend darstellen zu können, empfiehlt sich mindestens die Gegenüberstellung von

relativer Luftfeuchte außen	⇔	relativer Luftfeuchte innen
Lufttemperatur außen	⇔	Lufttemperatur innen
Taupunkttemperatur	⇔	Oberflächentemperatur

Außerdem ist die Erhebung weiterer Daten für die Auswertung von Messergebnissen sinnvoll.
Dieses sind nutzungsspezifische Daten wie:

- "Öffnungszeiten" von Türen und Fenstern (Lüftungszeitraum)
- Anzahl der Nutzer
- eventuelle Beheizung bzw. Temperierung während des Messzeitraums

da diese die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit beeinflussen.
Ebenso sind besondere Klimadaten (Regenfälle, starke Sonneneinstrahlung, u.a.) zu erfassen, um eventuelle Wirkzusammenhänge herstellen zu können.

Ist ein Zusammenhang zwischen diesen Daten und einer nachgewiesenen Sommerkondensation zu erkennen, sollte er in den Diagrammen durch Eintragungen - beispielsweise der Lüftungszeiträume - deutlich gemacht werden.

Darüber müssen die Taupunkttemperaturen θ_S des Außenklimas und dem Innenklima der Kirche aus den entsprechenden Werten der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit berechnet werden.

Aus dem Vergleich der beiden Taupunkttemperaturen $\theta_{S,innen}$ und $\theta_{S,außen}$ können Rückschlüsse auf die Feuchtigkeitsursachen gezogen werden. Diese sind:

$\theta_{S,innen}$	>	$\theta_{S,außen}$	Feuchtequellen im Inneren vorhanden (z.B. Kondensation)
$\theta_{S,innen}$	<	$\theta_{S,außen}$	Entfeuchtungsmaßnahmen oder Lüftungsvorgänge
$\theta_{S,innen}$	~	$\theta_{S,außen}$	guter Feuchteausgleich zwischen innen und außen

Um die Übersichtlichkeit der Messdaten zu gewährleisten, ist die Erstellung von Tages-, Wochen- oder Monatsdiagrammen obligatorisch. So können zum Beispiel Auffälligkeiten bei den Messungen, hervorgerufen durch Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit beim Öffnen von Fenstern und Türen, erfasst werden.

Sind die Messungen im festgelegten Messzeitraum abgeschlossen und datentechnisch ausgewertet, kann aus den erstellten Berechnungen und Diagrammen abgelesen werden:

- zu welchem Zeitpunkt,
- bei welcher Lufttemperatur außen und innen,
- bei welcher relativen Luftfeuchtigkeit außen und innen
- und bei welchen Nutzungen des Gebäudes ("Öffnungszeiten" von Türen und Fenstern, Gottesdienste, Veranstaltungen, etc.)

sich Taupunktunterschreitungen und damit eine Kondensation über den Messzeitraum eingestellt haben.

Unter Zugrundelegung dieser Ergebnisse können den Verantwortlichen für das Gebäude Hinweise gegeben werden, wie diese Taupunktunterschreitungen und damit schädliche Auswirkungen auf die Bausubstanz vermieden werden können. Unter Bezugnahme auf das Auftreten von Sommerkondensation im Zusammenhang mit einem unsachgemäßen Lüftungsverhalten kann deutlich gemacht werden, welche Bedeutung der richtige Lüftungszeitpunkt auf die Reduzierung von Sommerkondensation hat (s. Kap. 8.2).

5.1.1 Messungen der Luftfeuchtigkeit

Zur Messung der Luftfeuchtigkeit können verschiedene Verfahren angewendet werden. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Anwendbarkeit für Langzeitmessungen, ihre Messgenauigkeit und ihre Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Umgebungen (z.B. Feuchträume oder staubanfällige Räume).

Hygrometrische Luftfeuchtemessung

Ein aus mehreren Einzelfasern bestehendes Messband aus Kunststoff oder organischem Material verändert bei Feuchteeinwirkung seine Länge. Diese Längenänderung ist ein Maß für die Luftfeuchtigkeit.

Die hygrometrische Luftfeuchtemessung ist für die dauerhafte Messung - auch in größeren Räumen - geeignet. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Messung in verschmutzter Umgebung, da das System leicht zu reinigen ist. Nachteile sind die geringe Genauigkeit von ± ca. 3% relativer Luftfeuchte (rH) und der träge Messvorgang.

Psychrometrische Luftfeuchtemessung

Dieses System besteht aus einem trockenen und einem ständig feucht zu haltenden Feuchtefühler. Aus der Temperaturdifferenz (psychrometrische Differenz) können die, auf einen Luftdruck von 1013 mbar bezogenen, Feuchtwerte berechnet werden.

Psychrometrische Luftfeuchtemesser sind Präzisionsgeräte mit einem hohen Genauigkeitsgrad (± 1% rH). Ein eingebauter Lüfter ist notwendig, da die Windgeschwindigkeit für eine solche Messung mindestens 2 m/s betragen muss[67]. Wegen der Abhängigkeit vom Vorhandensein eines Stromnetzes, dem hohen Wartungsaufwand für die Feuchthaltung des Fühlers und der eingeschränkten Einsetzbarkeit bei niedrigen Feuchten und Minustemperaturen (Frostgefahr), ist der Einsatzbereich eingeschränkt.

Kapazitive Feuchtemessung

Bei kapazitiven Sensoren ist auf einem Glassubstrat eine feuchteempfindliche Polymerschicht zwischen zwei Metallelektroden aufgebracht. Durch Feuchtigkeitsaufnahme entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit ändert sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist direkt proportional zur relativen Feuchte und unabhängig vom Umgebungsluftdruck[68].

Kapazitive Feuchtmesser ermöglichen eine Langzeitmessung ohne Wartung - unabhängig vom Umgebungsluftdruck und auch bei Minustemperaturen. Allerdings ist die Langzeitstabilität der Feuchtefühler eingeschränkt (Überprüfung nach ca. einem Jahr empfehlenswert)

[67] Ahlborn 2011, S. 3-3-20.
[68] Ahlborn 2011, S. 3-3-3.

und sie sind empfindlich gegenüber Betauung. Die Genauigkeit liegt bei ± 2% rH[69].

Die Anzahl der einzusetzenden Fühler ist von der erwünschten Messdichte abhängig. In größeren Räumen (z.B. Kirchen) sind an mehreren Stellen Fühler anzubringen, um Veränderungen der Luftfeuchtigkeit durch Öffnen von Fenstern oder Türen schnell und dauerhaft zu erfassen.

Geräte zur Messung der Luftfeuchtigkeit sind an Orten anzubringen, die gewährleisten, dass sie nicht von direkter Feuchtigkeit, wie etwa im Außenbereich durch Regen, in negativer Weise beeinflusst werden. Bei kapazitiven Luftfeuchtefühlern kann es unter Umständen, das heißt in Räumen mit besonders hoher Luftfeuchtigkeit, zu einer direkten Kondensation an der Oberfläche des Fühlers kommen. Die tatsächlich vorhandene Luftfeuchtigkeit im Raum kann daher nicht ermittelt werden, da als Messwert stets 100% rH anzeigt wird. Eine schnelle Trocknung der Fühleroberfläche und eine damit verbundene rasche Wiederherstellung der "Messfähigkeit" findet wegen der hohen Raumluftfeuchte nicht statt. In diesem Fall ist auf eine Messung mit einem Psychrometer zurückzugreifen. Grundsätzlich sollten kapazitive Feuchtefühler so angebracht werden, dass die Fühlerspitze mit der Öffnung nach unten zeigt. So besteht die Möglichkeit, dass Kondenswasser abfließen kann.

5.1.2 Messung der Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wird überwacht, um einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen atmosphärischen Variablen und der Reaktion der Gegenstände des kulturellen Erbes herzustellen[70]. Änderungen der Lufttemperatur haben Auswirkungen auf die relative Luftfeuchtigkeit und damit auf Schwind- und Quellprozesse und auf die Temperatur der Baustoffoberflächen.
Zur Messung der Lufttemperatur können unterschiedliche Messgeräte verwendet werden. Analoge Thermometer sind ebenso geeignet wie digitale Thermometer oder Kombinationsgeräte mit mehreren Funktionen.
Bei der Auswahl eines geeigneten Fühlers ist vor allem auf den Temperaturbereich, den Toleranzbereich und die Beständigkeit gegenüber dem Zustand der verschiedenen Medien (z.B. hohe Luftfeuchtigkeit, Verschmutzung der Luft) zu achten.
In den untersuchten Kirchen waren beispielsweise Lufttemperaturen um den Gefrierpunkt zu erwarten sowie eine hohe relative Luftfeuchte über 80% rH. Dahingehend wurden die Messfühler ausgewählt (vgl. Kap. 5.3).
Bei Langzeitmessungen kommen häufig Geräte zum Einsatz, die eine Kombination aus

[69] Ahlborn 2011, S. 3-3-5.
[70] DIN EN 15758:2010-12, S. 8.

Feuchtefühler (s. Kap. 5.1.1) und Temperaturfühler darstellen.

Anzahl und Anordnung von Lufttemperaturfühlern sind analog der Luftfeuchtigkeitsmessungen zu sehen. Sie sollten außerdem nicht an Orten angeordnet sein, die direkter Wärmestrahlung (z.B. Heizkörper oder Sonneneinstrahlung) ausgesetzt sind, um die Messdaten nicht zu "verfälschen".

5.1.3 Messung der Oberflächentemperatur des Baustoffes

Abhängig von der Messaufgabe sind die geeigneten Messfühler nach folgenden Kriterien auszuwählen[71]:

- Messbereich
- Genauigkeit
- Ansprechzeit
- Beständigkeit
- Bauform

Ebenso ist die Beschaffenheit der Oberfläche, auf welcher der Fühler angebracht wird, von Bedeutung. Hierbei müssen die Anforderungen an die Ebenheit und die Rauigkeit der Oberfläche beachtet werden. Eine möglichst zerstörungsfreie Anbringung sollte gewährleistet sein. Beim Anbringen des Fühlers mit Klebemitteln ist auf die Materialverträglichkeit mit der Baustoffoberfläche zu achten.

Bei den Messfühlern sind grundsätzlich Strahlungsthermometer, Thermoelemente und Widerstandssensoren zu unterscheiden.

Strahlungsthermometer (Infrarot-Sensoren)
Die Messung mit einem Strahlungsthermometer erfolgt berührungslos und erfasst die Wärmestrahlung von Objekten. Sie ermöglicht die Erfassung von örtlich genau zuzuordnenden Temperaturen und ist abhängig vom Emissionsgrad des Bauteils.
Ein Einsatz an unzugänglichen Stellen und Oberflächen mit geringer Wärmeleitfähigkeit und geringer Wärmekapazität ist ohne Zerstörung der Bausubstanz möglich. Die Ansprechzeit der Sensoren ist lang und die Genauigkeit liegt zwischen ± 1°C $\pm$ 1,5%[72].
Ein Strahlungsthermometer ist aufgrund seiner Handhabung (Anbringung, Kenntnis des Emissionsgrades) nicht für die Anwendung durch fachliche Laien geeignet.
Ebenfalls berührungslos und auf dem Prinzip der Messung von Infrarotstrahlen basierend

[71] vgl. Ahlborn 2011, S. 3-1-1.
[72] Ahlborn 2011, S. 3-1-12.

sind "Quasikontaktthermometer" zu nennen. Bei diesen wird die abgegebene Infrarotstrahlung auf einen konkaven Spiegel mit Sensor fokussiert. Diese Methode ist unabhängig von der Oberflächenstruktur durchführbar (Ausnahme: polierte Oberflächen) und eignet sich sehr gut für besonders erhaltenswertes Kulturgut[73].

Thermoelemente

Zwei punktverschweißte Drähte aus unterschiedlichen Metallen und Metalllegierungen (z.B. Nickel-Chrom-Legierung und Nickel oder Eisen und Kupfer-Nickel-Legierung) nutzen den thermoelektrischen Effekt an ihrer Kontaktfläche aus. Die hervorgerufene - relativ kleine - Thermospannung ist von der Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Anschlussklemme abhängig. Unterschieden werden diese Elemente nach Temperaturbereich, Empfindlichkeit und nach Verträglichkeit mit verschiedenen Medien[74]. Die Genauigkeit wird nach DIN/IEC 584-2 in zwei Klassen unterteilt: Klasse 1 mit ± 1,5°C und Klasse 2 mit ± 2,5°C.

Thermoelemente lassen sich mittels Klebestreifen zerstörungsfrei an einer Wandoberfläche anbringen. Jedoch ist zu prüfen, ob etwaige Kleberückstände die Baustoffstruktur zerstören könnten. Die Durchführung einer Haftzugprüfung ist vor dem Anbringen der Messfühler angeraten.

Widerstandssensoren

Bei der Messung der Temperatur mit Widerstandssensoren werden so genannte Pt100-Fühler oder NTC-Sensoren eingesetzt.

Die Messung mit Pt100-Fühlern basiert auf einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes bei zunehmender Temperatur. NTC-Sensoren haben einen wesentlich höheren Widerstand und einen negativen Temperaturkoeffizienten. Dies bedeutet, dass der Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt.

Wie bei den Thermoelementen wird die Ermittlungsgenauigkeit in zwei Genauigkeitsklassen unterteilt (DIN/IEC 751): Klasse A und Klasse B. Sie sind bei beiden Messmethoden unterschiedlich und hängen von der Temperatur des zu messenden Baustoffes ab. Bei Pt100-Fühlern und einem Temperaturbereich von -100°C bis +100°C beträgt die Genauigkeit ± 0,8°C (Klasse B als Standardausführung); bei NTC-Fühlern im Bereich zwischen 0°C und +70°C beträgt sie ± 0,1°C (Klasse A)[75].

Je nach Einsatzbereich sind Widerstandssensoren in unterschiedlichen Bauformen erhältlich. Zur zerstörungsfreien Messung in historischer Bausubstanz eignen sich insbesondere

[73] vgl. DIN EN 15758:2010-12, S. 11.
[74] Ahlborn 2011, S. 3-1-4.
[75] Ahlborn 2011, S. 3-1-5.

so genannte "Anlegefühler", welche mittels geeignetem Klebeband, Kabelschellen oder Silikonpunkt am Bauteil befestigt werden können. Ein dauerhafter Kontakt zur Baustoffoberfläche muss gewährleistet sein. Die Wahl der geeigneten Befestigung hängt von der Baustoffoberfläche, ihrem Zustand und ihrer denkmalpflegerischen Wertigkeit ab.

Grundlegend sollte die Anbringung von Messfühlern, die im Kontakt mit der Baustoffoberfläche angebracht werden mit einem geeigneten Fachmann (z.B. Restaurator bei Wandfassungen) abgestimmt werden. Zudem sollte eine Oberfläche vorhanden sein, die durch eine glatte, ebene und gleichmäßige Struktur einen guten thermischen Kontakt mit der Messsonde bietet[76].

Die Anordnung von Messfühlern zur Ermittlung der Oberflächentemperatur sollte in zwei Ebenen erfolgen. Die erste Ebene in ca. 10 cm Höhe über OK Fußboden erfasst Temperaturänderungen, die durch eventuell aufsteigende Feuchte hervorgerufen, jedoch durch eine kühlere Fußbodentemperatur nicht beeinflusst werden. Ein zweiter Fühler wird oberhalb eines möglicherweise vorhandenen Feuchtehorizonts angebracht. Die Höhe kann optisch überprüft werden oder anhand von Feuchtemessungen ermittelt werden. In den überwiegenden Fällen ist eine Höhe von 50 cm über OK Fußboden angemessen.

5.1.4 Messung der Baustofffeuchtigkeit vor Ort

Zur qualitativen Analyse der Feuchte ist die Methode mit kapazitiven Feuchtesensoren geeignet. Unter Ausnutzung der hohen Dielektrizitätskonstante von Wasser durchdringt ein hochfrequentes elektrisches Feld das zu messende Material und erzeugt durch Kapazitätsmessung ein Spannungssignal, das proportional zur Materialfeuchte steht[77]. Die Eindringtiefe des Messfeldes in das zu messende Material beträgt ca. 25 bis 30 mm. Die Verarbeitung des Messsignals durch die Messsonde ist auf das Material abzustellen (z.B. mineralische Baustoffe wie Ziegel und Putz oder organische Baustoffe wie Holz). Im Allgemeinen lässt sich dieser materialspezifische Wert am Messgerät einstellen.

Mithilfe der kapazitiven Feuchtemessung kann sehr schnell eine größere Wandfläche überprüft werden. Das Anlegen eines Messrasters von 25 mal 25 cm bis in ca. zwei Meter Höhe und einer Breite von zwei Metern ist für derartige Messaufgaben ausreichend, um ein aussagekräftiges Feuchtediagramm einer Wand zu erstellen. Wird eine differenzierte Aussage über den Feuchteverlauf gewünscht oder ist dies erforderlich, so kann dies durch eine Anpassung des Messrasters erfolgen. Bei der Messung mit Geräten, die auf einer kapazitiven

[76] DIN EN 15758:2010-12, S. 10.
[77] Ahlborn 2011, S. 3-3-28.

Messung beruhen, werden die - in der Baustoffoberfläche vorhandenen - Salze mitberücksichtigt.

Ein weiteres zerstörungsfreies Verfahren zur Feuchtemessung innerhalb eines Messrasters ist das sogenannte Mikrowellenmessverfahren. Dieses nutzt den Unterschied zwischen der Dielektrizitätskonstante von Wasser und dem eines Baustoffes. Je nach Hersteller des Messgerätes und des verwendeten Messkopfes beträgt die Eindringtiefe 30 bis 300 mm. Dieses Verfahren ermöglicht eine salzunabhängige Messung.

Die Anwendung von Thermografie (Infrarotverfahren) erlaubt bei freien, nicht durch Einbauten verstellten, Wandflächen ebenfalls eine qualitative Feststellung von feuchten Oberflächen. Hierbei wird die Wärmeabstrahlung in Form der Verdunstungskälte erfasst und in einem bildgebenden Verfahren verdeutlicht. Die Anwendung der Thermografie zur Feststellung feuchter Oberflächen ist nur in Verbindung mit Feuchtemessungen sinnvoll, um Fehlinterpretationen der Messwerte zu vermeiden.
Trotz seines hohen Messaufwandes, der unabdingbaren Vorkenntnisse des Bedienungspersonals und des Einsatzes hochwertiger Geräte wird dieses Verfahren häufig in der Denkmalpflege eingesetzt, da es zerstörungsfrei durchzuführen ist. Im Vorfeld ist zu prüfen, ob diese Methode angewandt werden kann. Ist beispielsweise der Bauteilaufbau oder der Emissionsgrad der Oberfläche nicht bekannt, ist von diesem Verfahren abzuraten.

Ebenso können Radarmessungen einen Aufschluss über die Baustofffeuchtigkeit geben. Hierbei werden elektromagnetische Wellen in das Bauteil abgestrahlt und sie bewegen sich dort mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit fort[78]. Über die Laufzeit der reflektierten Wellen kann die Baustofffeuchtigkeit bestimmt werden.
Die Auswahl der Radargeräte erfolgt in Abhängigkeit des Untersuchungszieles, der gewünschten Eindringtiefe, Auflösung und der Zugänglichkeit. Die Verwendung von Radarantennen mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit kann die Aussagegenauigkeit deutlich verbessern[79].
Zum Zeitpunkt der Erfassung der Messergebnisse in den Kirchen lagen noch keine ausreichenden Erfahrungen mit dieser Messmethode vor. Zum heutigen Zeitpunkt stellen Messungen durch Radarantennen jedoch einen allgemeinen Standard der Messtechnik dar.

Die beschriebenen Methoden können dazu dienen Feuchteschadensmechanismen durch Sommerkondensation von aufsteigender Feuchtigkeit oder gegebenenfalls hygroskopisch bedingter Feuchtigkeit abzugrenzen.

[78] Arendt/Seele 2001, S. 33.
[79] vgl. Patitz 2012, S. 83f.

5.1.5 Erfassung der "Öffnungszeiten" von Türen und Fenstern

Eine unabdingbare Größe zum Feuchteschadensphänomen Sommerkondensation ist das Erfassen der Zeiten, zu denen Türen oder Fenster im Gebäude geöffnet sind. Eine einfache Kontrolle kann über den Einbau von Reed-Kontakten erfolgen. Reed-Kontakte bestehen aus zwei Magneten, die einem Stromkreis ausgesetzt sind. Sind Türen oder Fenster geschlossen, fließt Strom. Wird der Stromkreis unterbrochen, wird der Zeitraum der Unterbrechung erfasst. So kann ein möglicher Zusammenhang zwischen herein gelüfteter und tageszeitabhängiger warmer bzw. kalter Luft mit der entsprechenden Erhöhung oder Minderung der Luftfeuchtigkeit und den Auswirkungen auf das Innenklima hergestellt werden.
Ist aus technischen oder finanziellen Gründen eine Anbringung von Reed-Kontakten nicht möglich, so müssen die Öffnungszeiten von Türen und Fenstern manuell erfasst werden. Hierzu ist es notwendig, dass eine zuverlässige Person diese Zeiten genau notiert.
Werden die Öffnungszeiten manuell aufgezeichnet, so bietet sich in diesem Zusammenhang auch die Erfassung der Nutzerzahlen an.

5.1.6 Erfassen von Nutzern

Das Erfassen von Nutzern, die durch ihre Atemluft oder auch durch feuchte Bekleidung Feuchtigkeit an die Luft abgeben, ist im Allgemeinen bei kleinen und mittleren Kirchen zu vernachlässigen. Ein sitzender Mensch gibt in einer Kirche, die im Temperaturbereich von 8 - 16°C gehalten wird, Wasserdampf in einer Größenordnung von 35 g/h ab[80]. Durch das große Luftvolumen eines Kirchenschiffes wird sich die relative Luftfeuchte bei "Normalbetrieb" einer Kirche nur unwesentlich ändern.
Eine Ausnahme bei der Erfassung von Nutzern bilden Räume, in welchen sich hochwertige, empfindliche Kunstwerke wie z.B. Gemälde befinden. Hier kann bei hohem Besucheraufkommen eine Schädigung der Malschicht durch den abgegebenen Wasserdampf auftreten. Auch an hohen kirchlichen Feiertagen kann sich die große Anzahl von Besuchern und dem damit verbundenen Anstieg der Luftfeuchtigkeit schädigend auf die Bausubstanz auswirken.

5.2 Untersuchungen im Labor

Bei den im Folgenden beschriebenen, ergänzenden Untersuchungen sollte darauf geachtet werden, dass diese möglichst substanzschonend ausgeführt werden. Eine zerstörungsfreie

[80] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 127.

Untersuchung ist jedoch nicht möglich, da im Regelfall Baustoffproben entnommen werden müssen, die im Labor analysiert werden können.

Sinnvolle bzw. empfehlenswerte Untersuchungen sind die Messung der Baustofffeuchtigkeit (aufsteigenden Feuchtigkeit) und die Analyse der bauschädlichen Salze (hygroskopisch bedingte Feuchtigkeit).

5.2.1 Messung der Baustofffeuchtigkeit im Labor

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Methoden ist es ratsam, den Feuchtegehalt der betroffenen Baustoffe und Bauteile zu ermitteln. Dieser erlaubt Aussagen über die Sättigungsfeuchte sowie den Durchfeuchtungsgrad und dient der Erstellung eines Feuchtediagramms.
Für eine genaue Messung der Baustofffeuchtigkeit ist die Trockenschrankmethode anzuwenden. Hierzu wird eine ausreichend große Materialprobe (ca. 100 Gramm) entnommen, im Labor gewogen und bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet (s. Kap. 3.1.5). Eine Lagerung der Probe bei definierter Luftfeuchtigkeit in einem Klimaschrank lässt Aussagen über die Sättigungsfeuchte des Materials zu. Der Quotient aus Feuchtegehalt und Sättigungsfeuchte ergibt den Durchfeuchtungsgrad des Baustoffes.
Bei Anwendung dieser Methode wird lediglich der "temporäre" Feuchtegehalt des Baustoffes gemessen, das heißt, der Feuchtegehalt wird auf den Zeitpunkt der Probenentnahme bezogen. Zudem ist die Entnahme einer für Messzwecke ausreichend großen Probe nicht zerstörungsarm durchzuführen. So würde beispielsweise die Erstellung eines Feuchtediagramms zu einer erheblichen Schädigung der Wand führen. Die Baustoffproben werden innerhalb eines zuvor festgelegten Untersuchungsfeldes durch Kernbohrungen entnommen. Je nach Größe des Messfeldes und des Messrasters kann der Substanzverlust erheblich sein. Diese Methode ist nur dann anzuwenden, wenn sie aus denkmalpflegerischer Sicht vertretbar ist.

Eine schnelle, relativ genaue Methode ist das Messen der Feuchtigkeit mit dem sogenannten CM-Verfahren[81]. Hier wird eine kleine Menge (3 -15 g) des Baustoffes entnommen, zerkleinert, gewogen und in ein metallisches Druckgefäß eingefüllt. Nach Zugeben einer Glasampulle mit Calciumcarbid und einer Stahlkugel, die die Glasampulle beim Schütteln zerstört, wird das Gefäß mit einem Manometer verschlossen und geschüttelt. Das Calciumcarbid verbindet sich mit dem Wasser des Baustoffes, wodurch Acetylengas entsteht, dessen Druck mit dem Manometer gemessen wird. Mittels einer Eichkurve kann der Feuchtegehalt der Baustoffprobe direkt abgelesen werden.

[81] Calcium-Carbid-Methode

Dieses Verfahren eignet sich gut für die Analyse vor Ort. Bei Reihenuntersuchungen wie beispielsweise der Erstellung eines Feuchtediagramms einer Wand ist diese Methode hingegen sehr zeit- und kostenaufwändig. Für die Analyse in einem Labor müssen die Baustoffproben entnommen, luftdicht verschlossen und beschriftet werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt auswerten zu können.

5.2.2 Ermittlung der Sorptionseigenschaften

Zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften eines Baustoffes wird zunächst die Trockenschrankmethode (s. Kap. 5.2.1) angewandt. Danach werden die Baustoffproben unter definierten Klimabedingungen in einem Klimaschrank gelagert. In der Regel werden die Proben bei einer Raumtemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte zwischen 52 und 97%[82] gelagert. Die unterschiedlichen relativen Luftfeuchten können durch das Einbringen gesättigter Salzlösungen eingestellt werden. Auch hier wird die Probe bis zur Gewichtskonstanz im Klimaschrank gelagert.
Für die Betrachtung von Baustoffen, die aus unbeheizten oder nur temporär beheizten Gebäuden stammen, ist es sinnvoll, die Lagerung auch bei einer Temperatur von 10°C durchzuführen. Des Weiteren sollte eine Wasserlagerung der Proben erfolgen. Auf diese Weise kann die maximale Wasseraufnahmemenge ermittelt werden.
Anhand der Messergebnisse können Sorptionsisothermen erstellt werden, die einen Aufschluss über die Sorptionseigenschaften (Absorption und Adsorption) des Baustoffes geben. Zudem kann aus dem Verlauf der Isothermen abgelesen werden, ob ein erhöhter Salzgehalt vorliegt (s. auch Kap. 5.2.3).

5.2.3 Messung der hygroskopischen Feuchtigkeit durch Salze

Wegen der materialspezifischen Eigenschaften der in früherer Zeit verwendeten Baustoffe und eines selten vorhandenen Witterungsschutzes kommt es bei historischer Bausubstanz häufig zu erheblichen Feuchtebelastungen durch hygroskopisch wirkende Salze.
Aufgrund dieses Umstandes ist eine Analyse, ob und welche Salze im Baustoffgefüge vorhanden sind, unerlässlich. Diese erlaubt auch eine überschlägige Ermittlung der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte.
Ob vorhandene Salze für die Bausubstanz schädlich sind, hängt auch vom Baustoff selbst ab. Eine mittlere Salzbelastung (Salzkonzentration 8 bis 25 mmol/kg) führt beispielsweise bei einem tonigen Sandstein bereits zu Zerstörungen; ein grobporiger Kalksandstein übersteht dies noch ohne Schäden[83].

[82] vgl. Arendt/Seele 2001, S. 37.
[83] Arendt/Seele 2001, S. 12.

Die Wasseraufnahme bei salzfreiem Ziegel beginnt erst kurz vor Sättigung der Luft. Das heißt, dass der Ziegel selbst bei sehr feuchter Luft trocken bleibt. Bei starker Versalzung nimmt er eine Wassermenge auf, die seiner Sättigung entspricht, was dazu führt, dass eine mit solchen Ziegeln gemauerte Wand selbst bei Trockenlegungsmaßnahmen stets durchfeuchtet sein wird. Sinkt die Feuchtigkeit in der umgebenden Luft, so wird ein Teil des durch das Salz gebundenen Wassers wieder frei und bewegt sich zur weiteren Schadensverbreitung in den kapillaren Poren der Wand weiter.[84]
Zur Salzanalyse stehen folgenden Methoden zur Verfügung:

- Qualitative Analyse
- Quantitative Analyse
- Halbquantitative Analyse

Die Anwendung dieser Methoden bedingt unterschiedliche Verfahren. Zur schnellen und kostengünstigen Analyse empfiehlt sich die halbquantitative Analyse mit Teststäbchen. Hierzu werden 10 g einer Baustoffprobe zerkleinert und mit 100 ml entionisiertem Wasser vermischt. Nach ca. 24 Stunden wird das Teststäbchen in die Lösung gehalten und das Ergebnis entsprechend der Verpackungsanleitung (Vergleich mit einer Farbskala) abgelesen.

Qualitative und quantitative Analysen erfordern dagegen hohen instrumentellen Aufwand und können daher nur im Labor ausgeführt werden.

Zur quantitativen Analyse stehen hier beispielsweise folgende Analysemöglichkeiten zur Verfügung[85]:

- Ionenchromatographie
- Röntgenfluoreszensanalyse
- Photometrie

Die beiden ersten Analysemöglichkeiten erfordern eine kostenaufwändige Messapparatur und fachlich ausgebildetes Personal. Photometrische Geräte sind mit einer entsprechenden Schulung zur Probenvorbereitung auch von Laien anzuwenden. Dem Messprinzip liegt zugrunde, dass die reflektierte Intensität eines ausgesandten Lichtstrahls gemessen wird. Bei der qualitativen Analyse - beispielsweise mittels eines Röntgendiffraktometers - lässt sich der Anteil unterschiedlicher Materialien im Salz exakt ermitteln. Sie gibt so Hinweise auf die Herkunft der Salze.

Erst mit der Kenntnis der vorhandenen Salze in der untersuchten Bausubstanz lässt sich, neben den weiteren beschriebenen Messungen zur aufsteigenden Feuchtigkeit und der Kondensation, die Ursache der aufgetretenen Feuchtigkeit genau bestimmen.

[84] Arendt/Seele 2001, S. 13.
[85] vgl. Arendt/Seele 2001, S. 34.

5.3 Angewandte Verfahren

Bei der Untersuchung der Kirchen wurden umfangreiche Messungen vor Ort und im Labor durchgeführt. Basierend auf den bisher beschriebenen Möglichkeiten wurden folgende Verfahren ausgewählt:

Zielgröße	Messprinzip/Geräte
Luftfeuchtigkeit	Kapazitive Messfühler
Lufttemperatur	Kapazitive Messfühler (Kombinationsfühler mit relativer Luftfeuchtigkeit)
Oberflächentemperatur	Widerstandssensoren
Datenspeicherung	Datenlogger (Auslesen der Messergebnisse erfolgte monatlich)
Taupunkttemperatur	Berechnung durch Software des Datenloggers
Öffnungszeiten von Fenster und Türen	manuelle Erfassung
Anzahl der Nutzer	manuelle Erfassung
Baustofffeuchtigkeit	Kapazitiver Feuchtefühler, Mikrowellen-Feuchtemessgerät, Trockenschrankmethode
Sorptionsisothermen	Lagerung im Klimaschrank bei 10°C und bei 20°C, Wasserlagerung
Salze	Teststäbchen und Photometer

Im Einzelnen werden nachfolgend die verwendeten Messeinrichtungen hinsichtlich der Zielgröße der Messungen sowie den Messbedingungen und den daraus folgenden Anforderungen an das Messgerät selbst beschrieben. Die Möglichkeiten und die Grenzen bezogen auf die Auswahl der Messgeräte werden aufgezeigt und die Geräteauswahl somit begründet.

Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

Hier wurde ein Kombinationsfühler verwendet, der auch bei Minustemperaturen eingesetzt werden kann. Da diese in den - nur temporär beheizten Kirchen - zu erwarten waren, fiel die Wahl auf einen kapazitiven Messfühler. Durch den weiten Messbereich der relativen Luftfeuchtigkeit (5 bis 98% rH) und die hohe Genauigkeit (±2% rH) des Fühlers war dieser für den Einsatz in den untersuchten Kirchen geeignet. Die Möglichkeit der Verlängerung des Fühlerkabels gestattete eine Anbringung ohne den Einfluss von Strahlungswärme und - im Außenbereich - ohne direkten Feuchteinfluss durch Regen oder Schnee. Für den Außen- und den Innenbereich wurden die gleichen Fühler (je ein Fühler) eingesetzt. Je nach klimatischen Verhältnissen wurden hier relative Luftfeuchten über 90% rH erreicht. Laut

dem Hersteller der Fühler, der Firma Ahlborn, ist bei Erreichen dieser Werte mit Messfehlern zu rechnen[86]. Nach einer Trocknung des Fühlers durch "bewegte Luft" wird der reguläre Messvorgang jedoch fehlerfrei fortgesetzt.

Der verwendete Kombinationsfühler soll nach Herstellerempfehlung nach einem Jahr neu kalibriert werden. Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Messmöglichkeiten mit kurzen Wartungs- und Kalibrierungsintervallen anderer Messfühler entspricht das dem sinnvollen Messzeitraum von 12 Monaten.

Oberflächentemperatur

Zur Messung der Oberflächentemperatur wurden Widerstandssensoren (sowohl Pt100 als auch NTC-Fühler) eingesetzt. Beide Fühlertypen unterscheiden sich in der temperaturabhängigen Genauigkeit, die jedoch mit maximal ±0,8 °C in einem für diesen Messzweck vertretbaren Bereich liegt. Diese Widerstandssensoren wurden gewählt, da sie - im Gegensatz zu Infrarotsensoren - kostengünstig und leicht anzubringen sind. Die Bauweise der Fühler (die Sensorspitze befindet sich an einem ca. 5 cm langen, isolierten Draht) machte ein "Anlegen" der Fühler an die Baustoffoberfläche - zum Teil ohne zusätzliche Befestigungselemente - möglich. Dies konnte durch das Biegen des Drahtes erreicht werden.

Datenspeicherung

Die Messungen erfolgten in einem zeitlichen Abstand von 30 Minuten. Die Vielzahl der gewonnenen Messdaten wurde mit einem Datenlogger aufgezeichnet und von diesem gespeichert. Im Abstand von ca. vier Wochen wurde der Datenspeicher ausgelesen und die Funktion der gesamten Messeinrichtung überprüft. Bei der Auswahl der Datenlogger wurde auf die Bewährung bei Langzeitmessungen und einen ausreichend großen Speicherplatz geachtet. Die Datenlogger mussten an ein vorhandenes Stromnetz angeschlossen werden, wobei der Stromverbrauch von der Anzahl und Art der Fühler sowie dem eingestellten Messintervall abhängt. Der notwendige Netzanschluss innerhalb des Gebäudes wurde von der jeweiligen Kirchengemeinde zur Verfügung gestellt. Ein geschützter Aufstellort für den Datenlogger muss in der Nähe des Netzanschlusses vorhanden sein. Zur Information der Nutzer sollten Hinweise auf die Messungen in der Kirche ausgelegt und alle Verantwortlichen informiert werden.

Taupunkttemperatur

Bestandteil des Lieferumfangs des Datenloggers ist eine Software, die mit dort hinterlegten Formeln aus den gemessenen Werten der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur die Taupunkttemperatur berechnet. Es erfolgte eine Verifizierung dieser Berechnung durch eigene Berechnungen. Abweichungen waren nicht festzustellen.

[86] Ahlborn 2011, S. 3-3-4.

Öffnungszeiten von Fenstern und Türen und Anzahl der Nutzer

Um zu überprüfen, ob das Lüftungsverhalten und die Anzahl der Nutzer Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation hat, wurden diese Parameter manuell durch einen Kirchenverantwortlichen erfasst und notiert. Hierzu lagen in den Kirchen Formblätter aus, in welchem die Lüftungszeiten und die Anzahl der Kirchenbesucher notiert wurden. Dieses Verfahren ist kostenneutral, setzt jedoch das Engagement eines gewissenhaft arbeitenden "Schriftführers" voraus.

Baustofffeuchtigkeit

An ausgewählten Oberflächen an der Nordseite (kälteste Bauteiloberfläche) der Kirchen wurden mit einem kapazitiven Messgerät (Fa. Doser) und mit einem Mikrowellen-Feuchtemessgeräte (Fa. hf-Sensor) die Baustofffeuchtigkeit gemessen. Durch die auf ca. 4 cm beschränkte Messtiefe des kapazitiven Messgerätes wurde analog ein Messkopf mit einer vergleichbaren Eindringtiefe von ca. 3 cm für das Mikrowellen-Messgerät gewählt. Die Anwendung zweier Messgeräte erfolgte, da beide auf einem unterschiedlichen Messprinzip beruhen. Die kapazitive Methode ist eine salz**ab**hängige Messung und die Mikrowellen-Methode zeigt salz**un**abhängige Messwerte an. Es werden demzufolge auch unterschiedliche Messergebnisse angezeigt, die einen Rückschluss auf das Vorhandensein von Salzen in den oberflächennahen Bauteilschichten zuließ. Innerhalb eines Messrasters mit einer Gesamtbreite und -höhe von je zwei Metern wurde im Abstand von je 25 cm Messungen durchgeführt, die Ergebnisse notiert und mittels einer Software ausgewertet. Es entstanden Grafiken mit einem farbig dargestellten Feuchteverlauf (s. Kap. 6.5), die Aussagen zu einer Feuchtverteilung innerhalb des untersuchten Bauteilbereiches zulassen.

Zur Prüfung der Baustofffeuchtigkeit im Labor wurden in den Kirchen - möglichst substanzschonend - Baustoffproben entnommen. Hierbei handelte es sich um Putz- oder Gesteinsproben, die mit der Trockenschrankmethode auf ihren Feuchtgehalt hin überprüft wurden. Die Proben wurden gewogen und bei 105°C bis zu deren Gewichtskonstanz getrocknet (s. Kap. 5.1.4). Zur Überprüfung dieses Gewichts wurden die Proben wöchentlich gewogen. Im Gegensatz zur Calciumcarbid-Methode (CM-Verfahren) kann diese Baustoffprüfung nur im Labor durchgeführt werden. Durch das Vorhandensein eines solchen Trockenschrankes war es möglich, dieses Verfahren anzuwenden.

Sorptionsisothermen

Nachdem die Proben im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet waren, konnte im Anschluss an die Prüfung der Baustofffeuchtigkeit die Feuchteaufnahmefähigkeit der Proben analysiert werden. Ein ebenfalls im Labor vorhandener Klimaschrank machte es möglich, durch das Einstellen verschiedener Temperaturen und die Verwendung gesättigter Salzlösungen, das materialbedingte Sorptionsverhalten zu ermitteln. Es wurden

Temperaturen von 10 °C und 20° C gewählt, weil diese den in den Kirchen vorkommenden mittleren Lufttemperaturen bei einer nur temporären Beheizung entsprachen. Durch die gesättigten Salzlösungen konnten relative Luftfeuchten zwischen 53% rH und 98% rH eingestellt werden. Die Salze (Natriumchlorid, Kaliumnitrat, Magnesiumnitrat) wurden entsprechend den in den Kirchen vorherrschenden Luftfeuchten ausgewählt. Ergänzt wurden die Klimaschrankmessungen durch eine Wasserlagerung der Baustoffe. Bei diesem Verfahren wurde die Materialprobe nach dem Einwiegen im trockenen Zustand in ein Wasserbad gelegt und dort ebenfalls bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Nach einer abschließenden Messung wurde festgestellt, wie viel Wasser der Baustoff maximal aufgenommen hat. Aus den Ergebnissen der Klimaschrankmessung der Wasserlagerung konnten Sorptionsisothermen erstellt werden. Ein Vergleich dieser Grafiken mit den in der Literatur vorhandenen Sorptionsisothermen unterschiedlicher Baustoffe zeigt deren materialspezifischen Kennwerte auf.

Sowohl die Messung der Baustofffeuchtigkeit als auch die Erstellung der Sorptionsisothermen wurden nur bei den Kirchen des 2. Jahrgangs durchgeführt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass möglichst geringe Eingriffe in die Bausubstanz vorgenommen werden sollten. Diese Baustoffproben wurden auch zur Feststellung bauschädlicher Salze in den untersuchten Kirchen verwendet.

Salze

Zunächst wurde unter Anwendung der halbqualitativen Methode mit Teststäbchen eine Salzanalyse der Proben vorgenommen. Ergänzend, und um genauere Aussagen zum Salzionengehalt treffen zu können, wurden die Baustoffe mittels eines Photometers untersucht. Im Gegensatz zu der Teststäbchenmethode ist dies eine aufwändige und kostenintensivere Methode, um mit den Ergebnissen einen Vergleich mit den Beurteilungskriterien nach WTA vorzunehmen (s. Kap. 6.4).

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnis aus den Untersuchungen kann jedoch gesagt werden, dass die Anwendung der Teststäbchen-Methode eine Tendenz des Salzgehaltes mit ausreichender Genauigkeit aufzeigt. Der Einsatz einer differenzierteren Methode ist nur dann notwendig, wenn der Salzgehalt entsprechend hoch ist.

6 Darstellung und Auswertungen der Messwerte

Anhand der Dorfkirche in Selbelang wird exemplarisch dargestellt, welche Messungen durchgeführt wurden, zu welchen Ergebnissen sie führten und welche Auswertungen damit möglich sind. Die Kirche in Selbelang wurde aus folgenden Gründen ausgewählt:

- Es sind keine Ausfälle der Messgeräte im Messzeitraum zu verzeichnen.
- Es ist Sommerkondensation aufgetreten.
- Eine detaillierte Dokumentation der Lüftungsvorgänge und Besucherzahlen ist vorhanden.

Diese Punkte ermöglichen die übersichtliche Darstellung der Messwerte und deren Auswertung, die anhand von Grafiken erläutert werden.

Bedingt durch die im Verlauf der unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der beiden Messzeiträume können die Ergebnisse jedoch nicht unreflektiert auf jede andere Kirche übertragen werden. Aus diesem Grund erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller Untersuchungen sowie deren Auswertung.

6.1 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

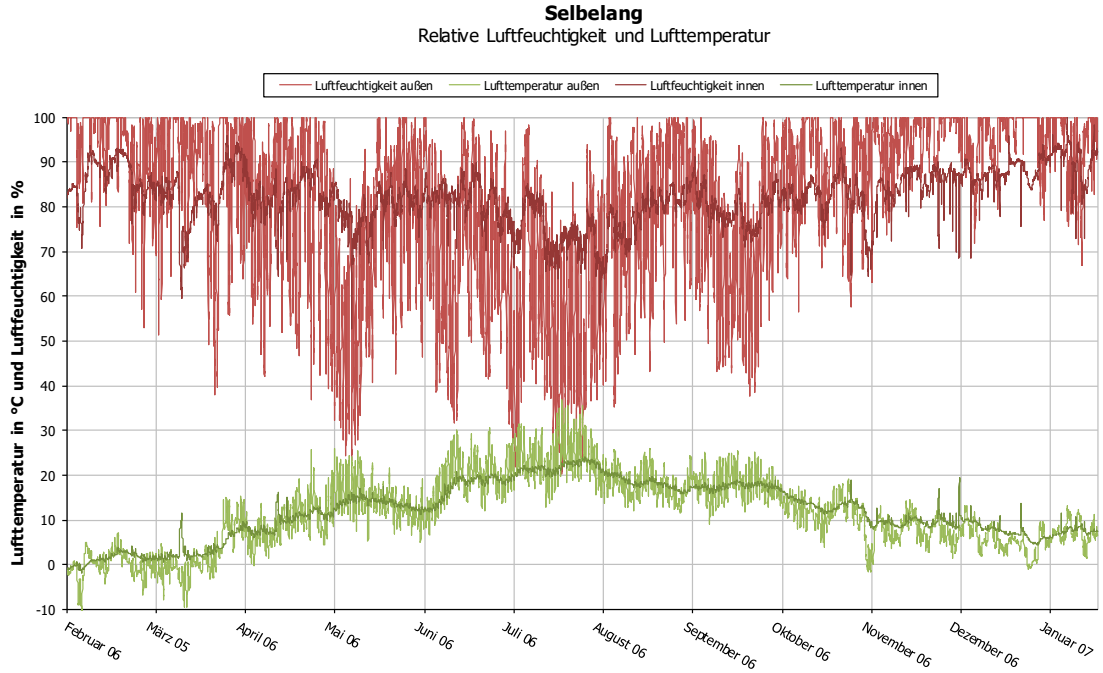


Abb. 6.1: Selbelang - Relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

Messwerte	Lufttemperatur außen (hellgrün) und innen (dunkelgrün) Relative Luftfeuchte außen (hellrot) und innen (dunkelrot)

In vorstehender Grafik werden die Messwerte des Außen- und des Innenklimas dargestellt. Es können Aussagen zur jahreszeitlichen Entwicklung der Lufttemperatur außen und der Raumlufttemperatur getroffen werden. Auffälligkeiten, wie beispielsweise ein starker Anstieg der Temperaturen, sind erkennbar und können im Weiteren anhand von Monats-, Wochen- oder Tagesgrafiken differenzierter betrachtet werden. Gleiches gilt für die relative Luftfeuchtigkeit. In einem Vergleich mit den Messwerten des Außenklimas kann abgelesen werden, inwieweit sich die relative Luftfeuchte des Außenklimas auf die Luftfeuchte im Inneren des Gebäudes auswirkt. So kann eine mögliche zeitliche Verzögerung festgestellt werden. Das heißt beispielsweise, dass eine Erwärmung der Luft im Außenbereich mit einer zeitlichen Verzögerung die Raumlufttemperatur erwärmt. Anhand weiterer Analysen kann festgestellt werden, welche Parameter (Wanddicke, Fenstergrößen, Lüftung, etc.) dies sind.

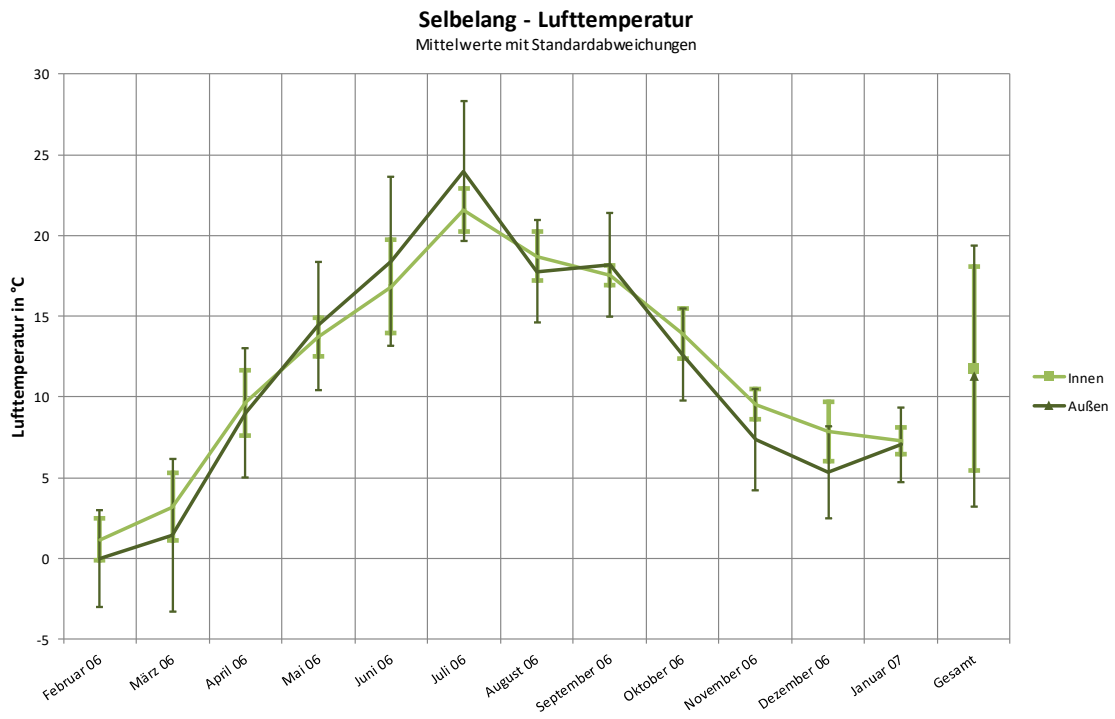


Abb. 6.2: Selbelang - Mittelwerte und Standardabweichungen[87] der Lufttemperatur

Messwerte	Raumlufttemperatur (hellgrün) Lufttemperatur außen (dunkelgrün)

Obige Grafik gibt Aufschluss über die monatlichen Mittelwerte der Lufttemperaturen im Außenbereich und im Inneren des Gebäudes. Mit den eingetragenen Standardabweichun-

[87] Unter Standardabweichung wird hier die Streubreite der Messwerte um den Mittelwert verstanden.

gen kann eine Aussage über die Streuung der Messwerte, d.h. die minimalen und maximalen Werte, die in dem betrachteten Monat aufgetreten sind, getroffen werden. Durch die Verbindung der Mittelwerte wird der Temperaturverlauf über den Messzeitraum deutlich.

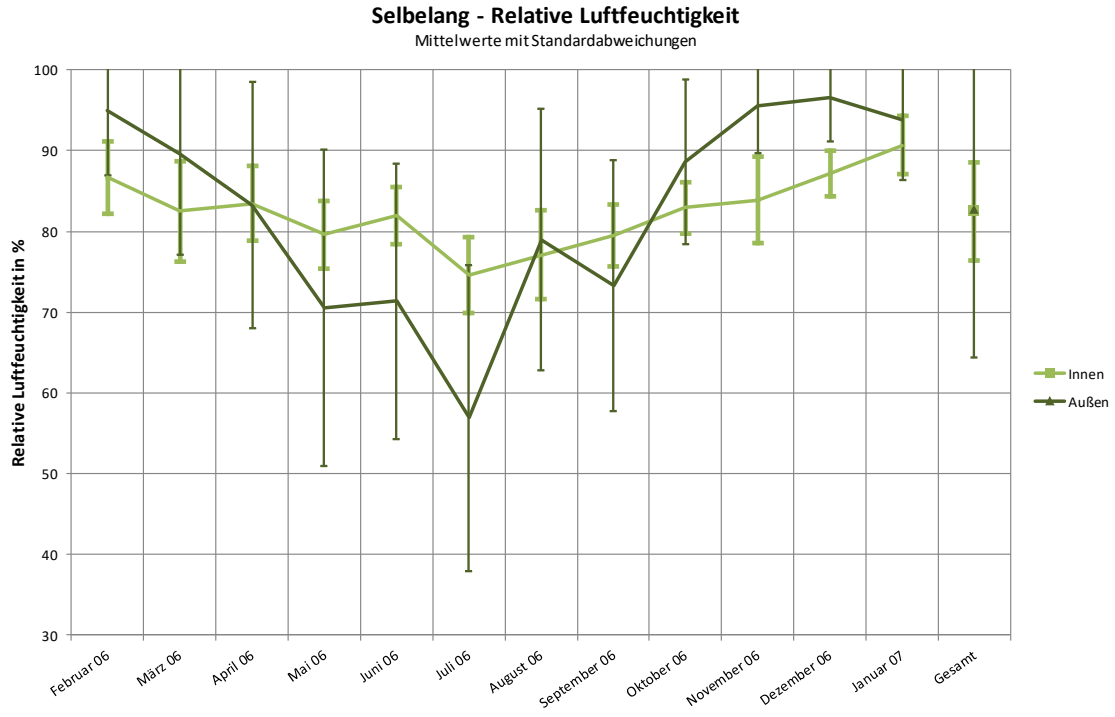


Abb. 6.3: Selbelang - Mittelwerte und Standardabweichungen der relativen Luftfeuchtigkeit

Messwerte	Relative Luftfeuchte innen (hellgrün) Relative Luftfeuchtigkeit außen (dunkelgrün)

Entsprechend der Grafik zur Lufttemperatur sind in dieser Darstellung die Werte der relativen Luftfeuchte aufgetragen. Die zu treffenden Aussagen sind analog zu sehen.

Eine stabile bzw. gleichbleibende relative Luftfeuchtigkeit ist maßgeblich für die Vermeidung von Schäden. Eine gleichmäßig hohe Luftfeuchte, bei der sich die Baustoffe und das Inventar "akklimatisiert" haben, wirkt sich in der Regel nicht schädlich aus. Kurzfristige Schwankungen der Luftfeuchte sind dagegen zu vermeiden (s. auch Kap. 8).

Anhand der nachstehenden Diagramme mit der jeweiligen Darstellung der Summenlinien kann beispielsweise die Frage beantwortet werden, mit welcher Häufigkeit bestimmte Lufttemperaturen bzw. Luftfeuchtigkeiten oder absolute Luftfeuchten aufgetreten sind. Der Verlauf der Kurven lässt Rückschlüsse auf das, in der Mehrheit vorzufindende, Raumklima in den Kirchen zu. Nahezu deckungsgleiche Linien deuten auf einen Ausgleich der äußeren und inneren Lufttemperatur bzw. Luftfeuchtigkeit oder der absoluten Luftfeuchte hin, da die Werte in diesem Falle ähnlich sind.

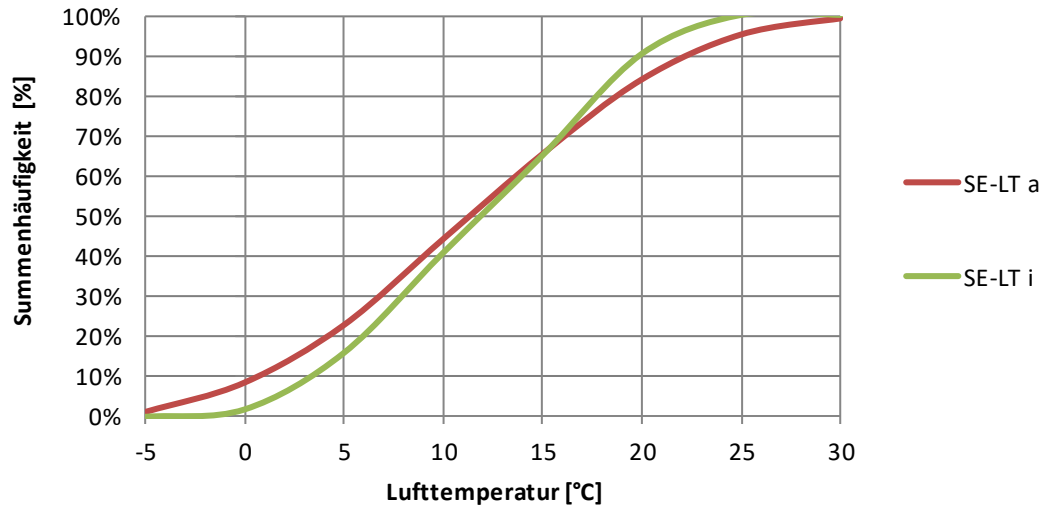


Abb. 6.4: Selbelang - Summenhäufigkeit der Lufttemperaturen

Messwerte	Lufttemperatur außen (rot) Lufttemperatur innen (grün)

Bei obiger Darstellung der Summenhäufigkeiten wird die prozentuale Häufigkeit der Messwerte addiert (kumulative Häufigkeit). Zur Ermittlung wurden die Messwerte in Klassen unterteilt. Ausgehend von einer Temperatur von -5°C wurden die Klassen in Temperaturschritten von 5 Kelvin bis zu 30°C aufgegliedert. Das Ergebnis gibt an, zu welchem prozentualen Anteil diese Messwerte im Verhältnis zu allen gemessenen Werten vorkommen.

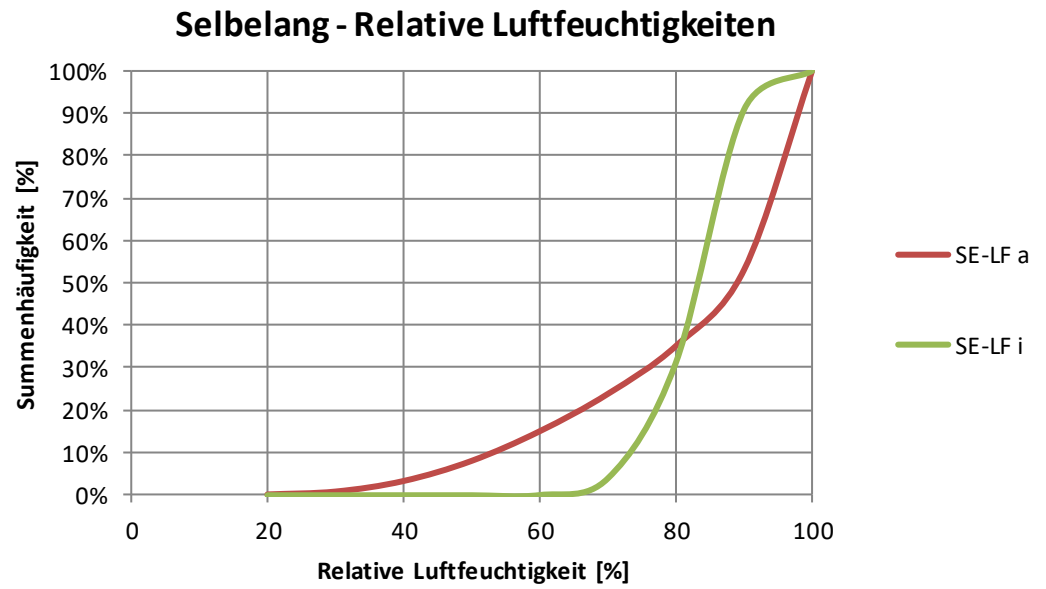


Abb. 6.5: Selbelang - Summenhäufigkeit der relativen Luftfeuchtigkeiten

Messwerte	Relative Luftfeuchtigkeit außen (rot) Relative Luftfeuchtigkeit innen (grün)

Die Klasseneinteilung für die vorstehende Grafik wurde in 10%-Schritten zwischen 0 und 100% relativer Luftfeuchtigkeit vorgenommen. Aus der Form der Summenlinien lässt sich ablesen, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Inneren des Gebäudes gleichmäßiger verläuft als die Luftfeuchtigkeit im Außenbereich. Dies bedeutet, dass die Schwankungen der Luftfeuchte im Inneren nicht in gleichem Maße auftreten wie im Außenbereich. Aus dem Verlauf der Summenlinie kann auf die Häufigkeit des Auftretens von hohen Luftfeuchtigkeiten geschlossen werden. Ein steiler Verlauf auf der "rechten" Seite des Diagramms weist auf das häufige Vorkommen hoher relativer Luftfeuchtigkeiten hin.

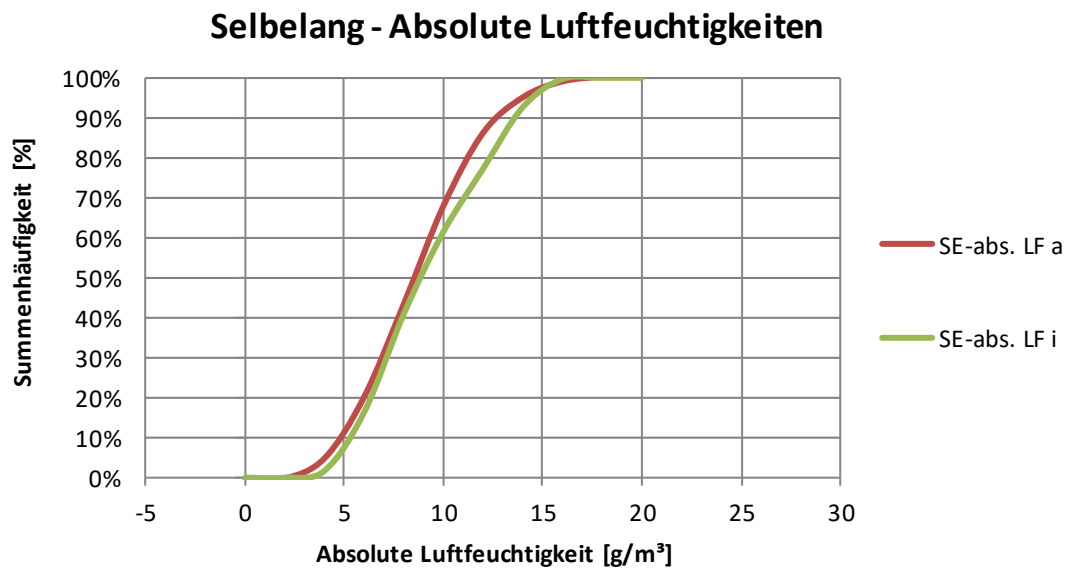


Abb. 6.6: Selbelang - Summenhäufigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeiten

Messwerte	Absolute Luftfeuchtigkeit außen (rot) Absolute Luftfeuchtigkeit innen (grün)

Zur Reduzierung des Auftretens von Sommerkondensation ist die Kenntnis der absoluten Luftfeuchtigkeit bedeutsam. Liegt diese im Außenbereich niedriger als im Inneren des Gebäudes, so wird feuchte Innenraumluft nach außen "weggelüftet" und die Gefahr von Kondensation gemindert. Die obige Grafik gibt Aufschluss darüber, mit welcher Häufigkeit bestimmte absolute Luftfeuchtigkeiten aufgetreten sind. Ein Vergleich darüber, ob zu bestimmten Zeitpunkten die absolute Luftfeuchte außen niedriger lag als im Inneren, muss anhand von Tagesgrafiken überprüft werden. Nur diese weisen eine ausreichende Genauigkeit auf.

6.2 Taupunkttemperatur und Oberflächentemperatur

Anhand der Messwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte wurden die Taupunkttemperaturen berechnet. Diese sind zum einen der Taupunkt der Sommerkondensation (bei 100% Wasserdampfsättigung) und zum anderen die Taupunkttemperatur der Kapillarkondensation (bei 80% Wasserdampfsättigung).

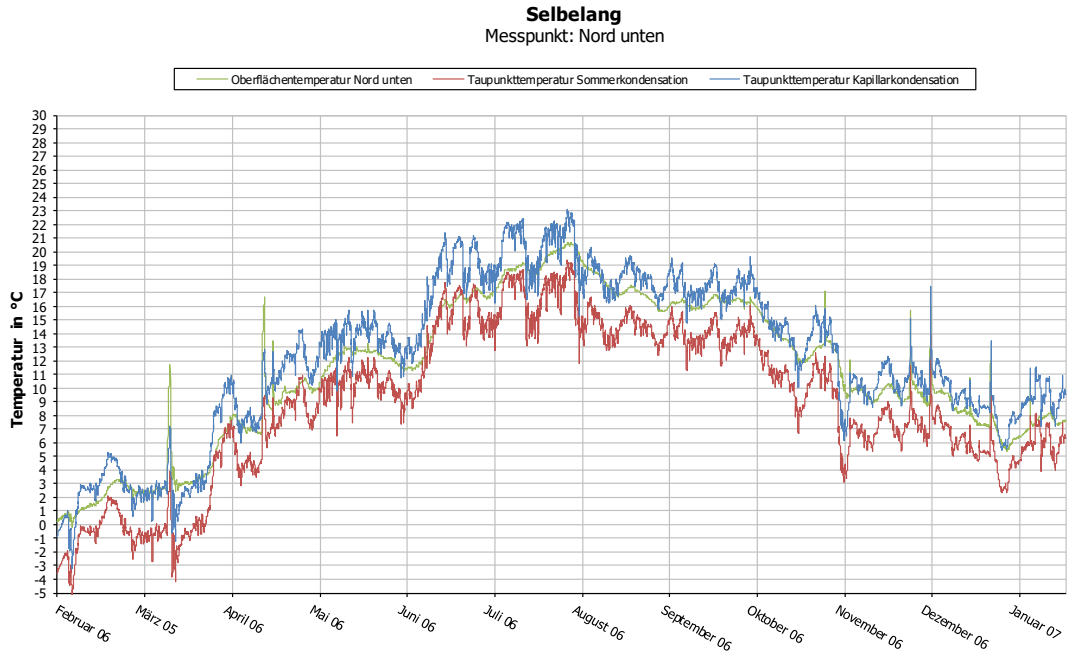


Abb. 6.7: Selbelang - Messpunkt Nord unten

Messwerte	Oberflächentemperatur (grün) Taupunkttemperatur der Sommerkondensation (rot) Taupunkttemperatur der Kapillarkondensation (blau)

Um festzustellen, ob Kondensation aufgetreten ist, wird die Taupunkttemperatur mit der Oberflächentemperatur verglichen. Liegt die Oberflächentemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur, so ist Kondensation aufgetreten. Dies lässt sich in der Grafik an der Überlagerung der Linien (Oberflächentemperaturlinie und Taupunkttemperaturlinie) erkennen. Es können Auffälligkeiten erkannt und gegebenenfalls durch dezidiertere Wochen- oder Tagesgrafiken differenziert werden. So stellt sich beispielsweise die Frage, welchen Ereignissen die Peaks im März, April sowie im November und Dezember zugrunde liegen. In diesen Fällen wurde die Kirche zu diesen Zeitpunkten geheizt.

Die Messung der Oberflächentemperatur erfolgte jeweils auf der Nord- und Südseite der Gebäude (bei Kirchen mit Ost-West-Ausrichtung) bzw. auf der Ost- und Westseite (bei Kirchen mit Nord-Süd-Ausrichtung). Ein Messfühler wurde in ca. 10 cm Höhe ab Oberkante

Fußboden, der zweite in ca. 50 cm Höhe angebracht. Die hier gezeigte Grafik stellt exemplarisch den Messpunkt "Nord unten" dar. Weitere Grafiken (s. Band 2) stellen alle Messpunkte der Taupunkttemperatur der Sommerkondensation gegenüber. Hieraus werden die Unterschiede der Messergebnisse in unterschiedlichen Höhen deutlich. Diese Darstellung veranschaulicht, dass der kühlere, untere Bauteilbereich anfälliger für das Auftreten von Sommerkondensation ist als der obere Bereich, der in der Regel höhere Temperaturen aufweist.

Ebenso ist erkennbar, dass sich die Oberflächentemperaturen gleichmäßiger "entwickeln" als die Taupunkttemperaturen; sind diese doch von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig.

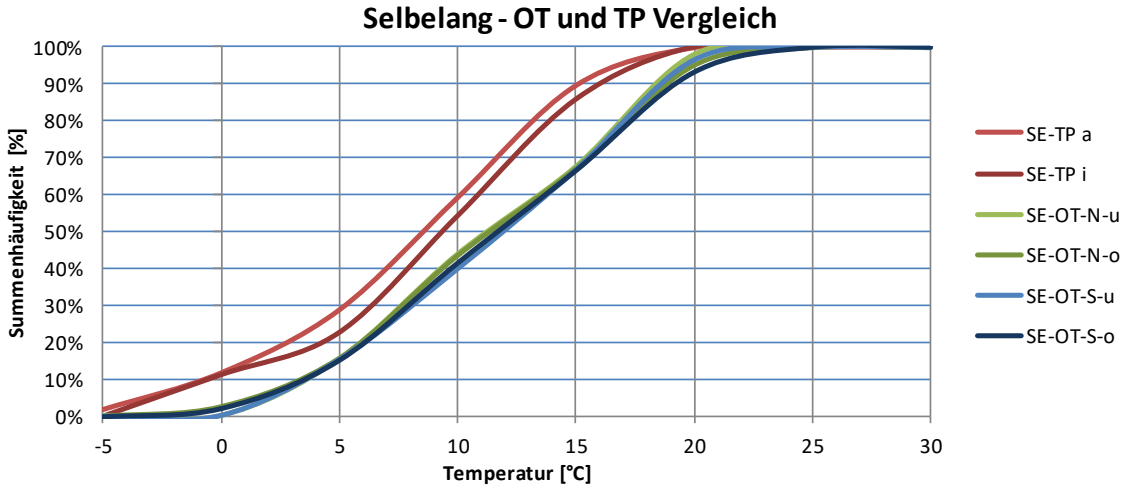


Abb. 6.8: Selbelang - Summenhäufigkeit der Oberflächentemperatur und der Taupunkttemperatur

Messwerte	Taupunkttemperatur außen und innen (rot) Oberflächentemperatur der Messpunkte Nord unten und oben (grün) Oberflächentemperatur der Messpunkte Süd unten und oben (blau)

Ergänzend zur Grafik der einzelnen Messpunkte wird hier die prozentuale Verteilung der Oberflächentemperaturen der Messpunkte und der Taupunkttemperatur dargestellt. Eine Häufigkeit des Auftretens bestimmter Temperaturen ist ablesbar. Ausgehend von der Temperatur (Abszisse) wird am Schnittpunkt der einzelnen Linien an der Ordinate (Summenhäufigkeit) die Häufigkeit des Auftretens der gewählten Temperatur (Oberflächentemperatur bzw. Taupunkttemperatur) abgelesen.

6.3 Auftreten von Kondensation

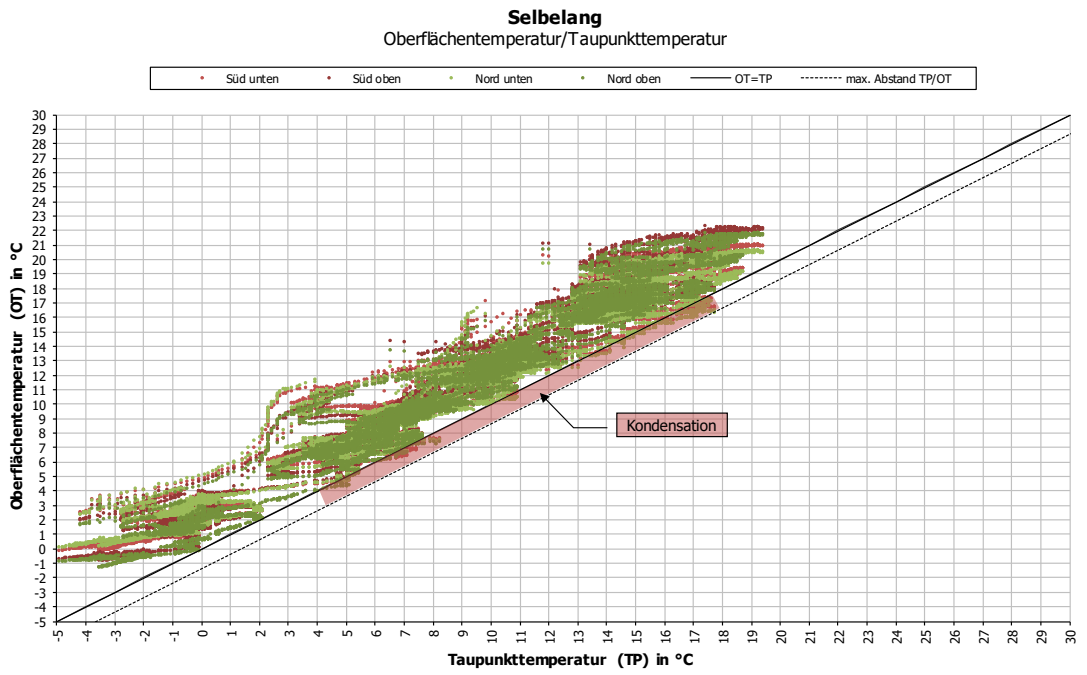


Abb. 6.9: Selbelang - Oberflächentemperatur/Taupunkttemperatur

Messwerte	Oberflächentemperatur Messpunkte Nord (grün) und Süd (rot)

Da eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur bedeutet, dass Kondensation auftritt, wurde zur Erstellung dieser Grafik die Oberflächentemperatur (OT) der Taupunkttemperatur (TP) gleichgesetzt (Grenzlinie OT = TP). Die Darstellung der einzelnen Werte ergibt sich aus den Taupunkttemperaturen und den Oberflächentemperaturen des Messzeitraums. Bei den Wertepaaren, die sich unterhalb der Grenzlinie befinden, ist Kondensation aufgetreten. Um hervorzuheben, bei welchem maximalen Taupunktabstand Sommerkondensation aufgetreten ist, wurde eine Orientierungslinie eingefügt, der dadurch entstehende Bereich farbig markiert und mit dem Begriff "Kondensation" beschriftet.

Mit Hilfe dieser Grafik lässt sich folglich feststellen, an welchen Messorten (Nord, Süd, oben und unten) Sommerkondensation aufgetreten ist und welcher maximale Taupunktabstand den Werten zuzuordnen ist. Weiter lässt der Verlauf der "Punktewolke" Rückschlüsse auf die raumklimatischen Verhältnisse zu. Eine "dichte" Wolke deutet auf eine geringe Spreizung der Oberflächentemperaturen über den Messzeitraum und somit auf eine gleichmäßigere Raumtemperatur hin. Eine weit auseinandergezogene "Wolke" zeigt auf, dass größere Raumtemperaturschwankungen aufgetreten sind, welche sich auf die Oberflächentemperaturen auswirken.

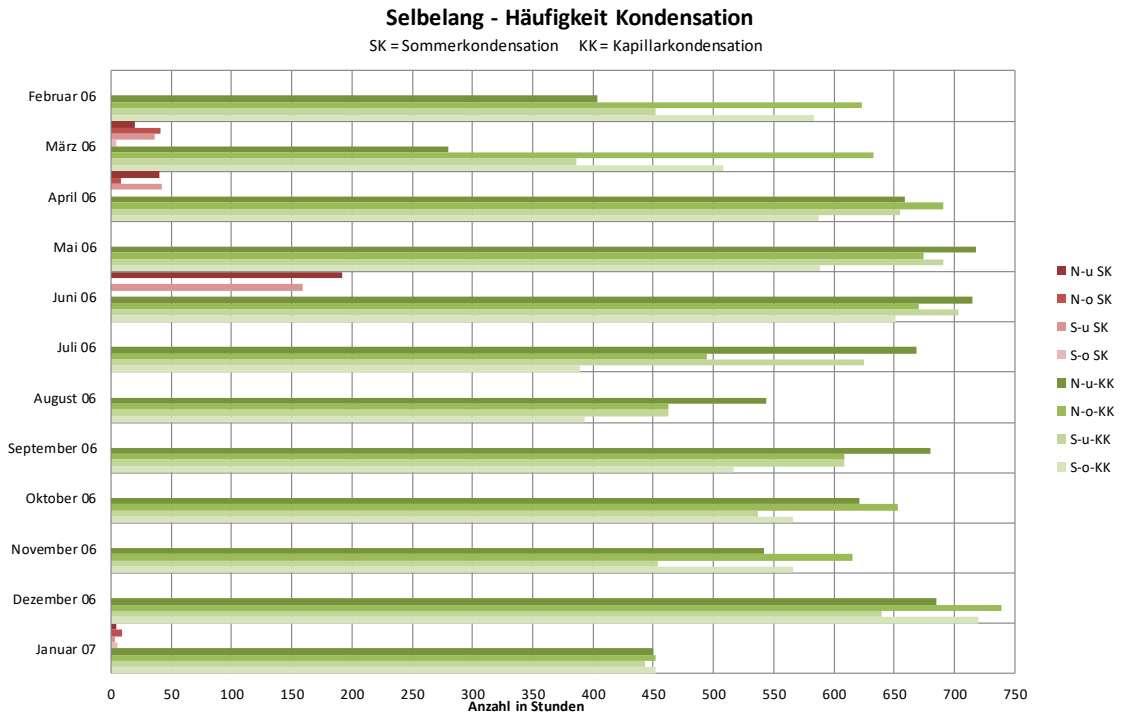


Abb. 6.10: Selbelang - Häufigkeit Kondensation - Monate[88]

Messwerte	Auftreten von Sommerkondensation (rot) und Kapillarkondensation (grün) an den Messpunkten Nord (N) und Süd (S), jeweils unten (u) und oben (o)

In obiger Darstellung lässt sich ablesen, welchen zeitlichen Umfang die Sommerkondensation und die Kapillarkondensation aufweisen. Da sich die Kapillarkondensation auf eine Wasserdampfsättigung von 80% bezieht, tritt diese weitaus häufiger als die Sommerkondensation.

Im Übrigen kann bestimmt werden, in welchen Monaten bzw. zu welcher Jahreszeit es zu einer Kondensation kam.

[88] Monate mit 31 Tagen entsprechen 744 Stunden
Monate mit 30 Tagen entsprechen 720 Stunden

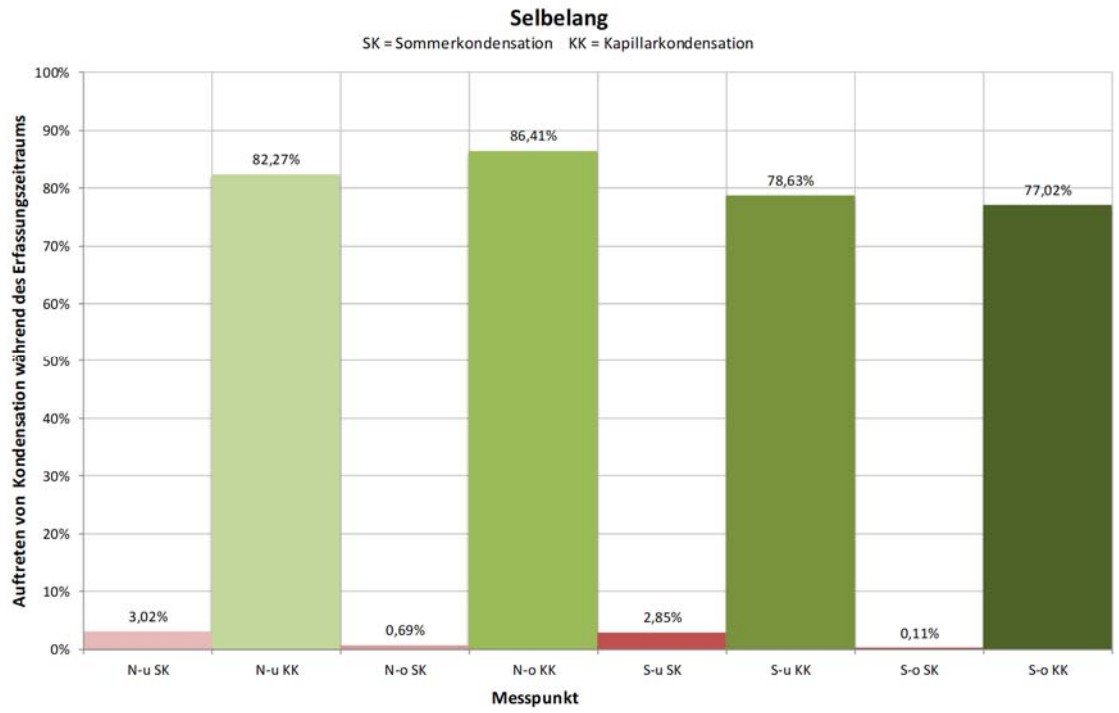


Abb. 6.11: Selbelang - Häufigkeit Kondensation - Prozent

Messwerte	Auftreten von Sommerkondensation (rot) und Kapillarkondensation (grün) an den Messpunkten Nord (N) und Süd (S), jeweils unten (u) und oben (o)

In Ergänzung zur Abb. 6.10 wird hier das Auftreten von Sommerkondensation und Kapillarkondensation an den einzelnen Messpunkten prozentual über den gesamten Messzeitraum betrachtet. Auch hier wird deutlich, dass die Kapillarkondensation zu einem weitaus höheren Prozentsatz aufgetreten ist als die Sommerkondensation.

6.4 Analyse der bauschädlichen Salze

Die mit einem Photometer (s. Kap. 5.2.3) gemessenen Werte der bauschädlichen Salze in der Kirche Selbelang wurden verglichen mit den Angaben in WTA-Merkblatt 4-5-99-D "Beurteilung von Mauerwerk - Mauerwerksdiagnostik". Dort sind in Tabelle 8 "Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauerwerkskörpern (Angabe in Masse%)" folgende Richtwerte genannt:

Tabelle 4: Angaben in Masse% - Auszug aus Tabelle 8 des WTA-Merkblattes 4-5-99/D[89]

Chloride	< 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Nitrate	< 0,1	0,1 - 0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5
Bewertung	Belastung gering - Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich	Belastung mittel - Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindungen, Kationenbestimmung) im Einzelfall erforderlich Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Belastung hoch - Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindungen, Kationenbestimmung) erforderlich Maßnahmen erforderlich

Wichtig scheint in diesem Zusammenhang die Erwähnung der Fußnote zum Punkt Bewertung: "Für die Entscheidung über das Erfordernis von Maßnahmen sind nicht allein die Ergebnisse der Salzuntersuchung ausschlaggebend"[90]. Sie sind also immer in Verbindung mit weiteren Untersuchungen zu sehen, um denkmalgerechte Maßnahmen daraus abzuleiten.

Die Messungen der Salze in der Kirche zu Selbelang ergaben folgende Werte:

Salz	Ergebnis in Masse%	Bewertung nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D (s. Tabelle 4)
Chlorid	0,059	Belastung gering - Maßnahmen nur in Ausnahmefällen erforderlich
Nitrat	0,846	Belastung hoch - Maßnahmen erforderlich
Sulfat	3,500	Belastung hoch - Maßnahmen erforderlich

Hinweis: Bei mittlerer und hoher Belastung sind weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt erforderlich (Salzverbindung, Kationenbestimmung)[91].

Die vorgenommenen Analysen der Salze dienen der Einschätzung, ob die aufgetretenen Feuchteerscheinungen ursächlich oder teilweise durch die Aufnahmen von Feuchtigkeit durch hygroskopische Salze begründet werden können. Zur Abgrenzung zu anderen Ursachen für Feuchteerscheinungen wurden weitere Feuchtemessungen durchgeführt (s. Kap. 6.5).

[89] WTA 4-5-99:2015-10, S. 16.
[90] WTA 4-5-99:2015-10, S. 16. Fußnote 3.
[91] WTA 4-5-99:2015-10, S. 16.

6.5 Feuchtemessungen

Die Grafiken stellen die Messergebnisse der Feuchtemessungen mit einem Mikrowellen-Feuchtemessgerät und einem kapazitiven Feuchtemessgerät dar.

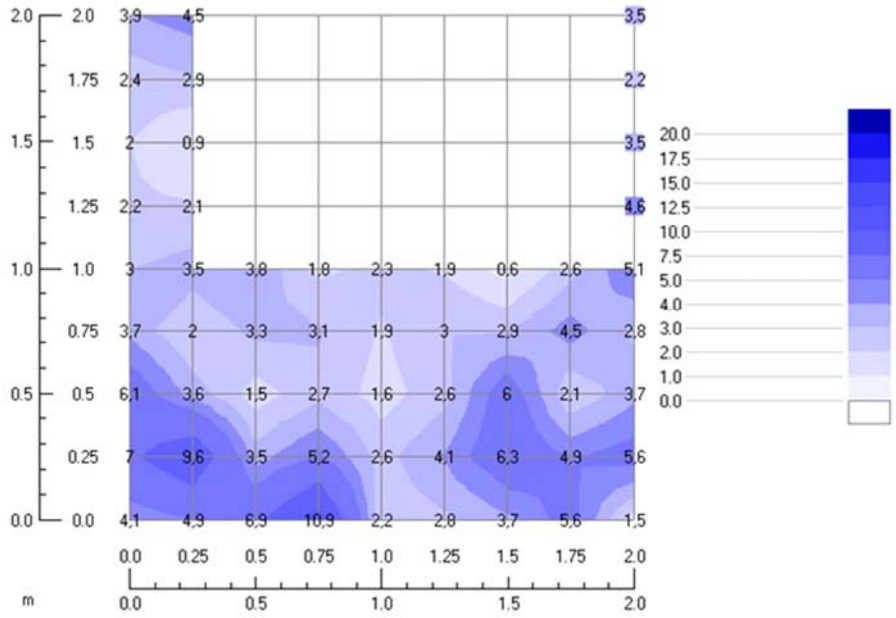


Abb. 6.12: Mikrowellen-Feuchtemessung

Messwerte	Feuchtegehalt in %

Hinweis: Im Bereich ohne Messwerte befindet sich ein Fenster.

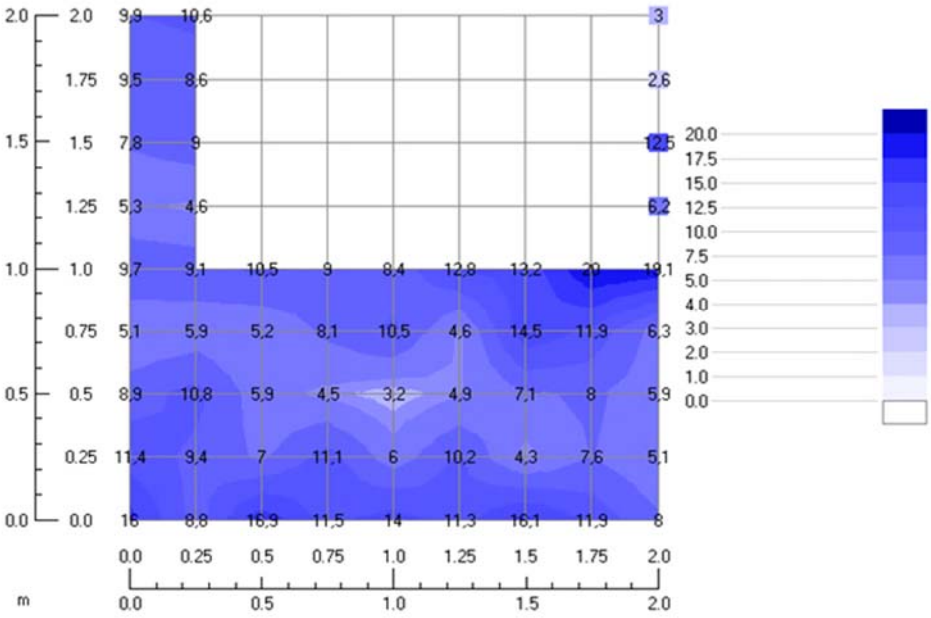


Abb. 6.13: Kapazitive-Feuchtemessung

Messwerte	Feuchtegehalt in %

Da die Feuchtemessung mit einem Mikrowellen-Messgerät salz**un**abhängige Messwerte anzeigt, lassen sich im Vergleich mit den Werten aus der Messung mit einem kapazitiven Feuchtemessgerät (s. Kap. 5.1.4) Rückschlüsse auf eine etwaige Salzverteilung innerhalb des Messrasters ziehen.

Aus Abb. 6.13 kann zunächst vermutet werden, dass oberhalb des Fußbodens und unterhalb des Fensters eine erhöhte Feuchtebelastung durch hygroskopische Salze vorliegt. In Zusammenhang mit den Auswertungen der Salzanalyse (s. Kap. 6.4) konnte diese Vermutung bestätigt werden. Es liegt eine hohe Salzbelastung durch Nitrate und Sulfate vor. Weiter können Rückschlüsse gezogen werden, welche Ursache diese Feuchteanreicherungen haben. So ist beispielsweise zu vermuten, dass die Feuchte unterhalb des Fensters aus Kondensationsphasen an der Glasfläche des Fensters und dem damit verbundenen Ablauf von Wasser herrühren. Durch eine optische Erfassung von Ablaufspuren unterhalb des Fensters konnte auch diese Annahme bestätigt werden.

In Verbindung mit der Salzanalyse und der Kenntnis weiterer Feuchteerscheinungen, die durch Messungen (s. Kap. 5) erfasst wurden, können Maßnahmen zur Behebung dieser Schäden abgeleitet werden.

Um Schadensmechanismen einordnen zu können, sind Bewertungsgrundlagen aufzustellen. Diese sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und werden nachfolgend beschrieben.

6.6 Bewertungsgrundlagen

In der Literatur werden zahlreiche Grenzwerte und Empfehlungen genannt, um die Raumschale und die Einrichtungsgegenstände - nicht nur historischer Gebäude - schadensfrei zu halten. Dies sind im Einzelnen:

Feucht/Trocken

Der Übergang zwischen einem feuchten und einem trockenen Raumklima ist fließend. Nach BUSS ist ein trockenes Raumklima einer relativen Luftfeuchte bis 40% rH[92] gleichzusetzen. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 bis 70% rH wird bereits als feuchtes Raumklima bezeichnet. Eine hohe relative Luftfeuchte allein ist nicht als "schädlich" einzustufen. Vielmehr sind häufige Wechsel der Luftfeuchtigkeit und die damit verbundene Einwirkung auf die Baustoffe schädlich für die historische Bausubstanz und das Inventar.

[92] Buss 2002, S. 307.

Frostgefahr

Wasser hat bei 4°C seine größte Dichte[93], daher ist der Grenzwert für die Frostgefahr bei dieser Temperatur anzusetzen.

Raumklima

Bei der Einordnung der Empfehlungen für das Raumklima in den unterschiedlichen Kirchen wird nicht von einem für den Menschen behaglichem Raumklima ausgegangen. Auf Grund der kurzen Aufenthaltsdauer des Menschen in Kirchen (bzw. unbeheizten oder nur temporär beheizten Gebäuden) ist diese "Behaglichkeit" nicht ausschlaggebend zur Beurteilung des optimalen Raumklimas für ein solches Gebäude. Vielmehr ist das optimale Raumklima für die Bausubstanz und das Inventar entscheidend. Hierzu werden von KÜNZEL[94] Wertepaare für das Raumklima von 8°C und 70% rH sowie 15°C und 50% rH als bewährte Klimabedingungen genannt.

Die von KÜNZEL genannten Werte finden sich mit ähnlichen Angaben in weiterer Literatur wieder (ARENDT, TROI und BURMESTER [95]). Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Beheizung und Temperierung von historischen Gebäuden, insbesondere Museen.

Orgel

Als eine der wertvollen Einbauten in Kirchen ist die Orgel zu nennen. Damit die Orgel sich nicht verstimmt, ist auf ein ausgeglichenes Raumklima zu achten. Zu hohe Luftfeuchtigkeiten führen zu einem Quellen des verwendeten Holzes und zu einer Korrosion der Metallteile. Der BUND DEUTSCHER ORGELBAUMEISTER nennt Grenzwerte für das Raumklima. Die Grundtemperatur wird mit 6 bis 8°C angegeben, die Höchsttemperatur mit 16°C und die relative Luftfeuchte mit 40 bis 70% rH[96]. Die in TROI genannte Aufstellung nach SCHELLEN nennt vergleichbare Werte für die relative Luftfeuchtigkeit[97].

Mikroorganismen

LORENZ gibt als Feuchtegrenze für das Keimen bzw. das Wachstum von Mikroorganismen eine relative Ausgleichsfeuchte von 70% rH[98] an. Je nach Art des Pilzes bzw. Bakteriums findet dieser Vorgang erst bei höheren Luftfeuchten statt. Der angegebene Wert dient daher der Festlegung einer unteren Feuchtegrenze.

[93] Buss 2002, S. 243.
[94] Künzel 2007, S. 87.
[95] Arendt 1993; Troi 2010; Burmester 2000
[96] Bund Deutscher Orgelbaumeister 2007, S. 1.
[97] Troi 2010, S. 45. und Schellen 2002, S. 1-10.
[98] Lorenz u.a. 2005, S. 37.

Metallkorrosion

Unter dem Begriff Korrosion wird die "physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung und des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann"[99] bezeichnet. Bei NEROTH wird als Grenzwert für das Auftreten von Korrosionserscheinungen eine relative Luftfeuchte von 60 bis 70% rH[100] genannt. Der Grenzwert in der Grafik wird daher bereits bei 60% rH angesetzt, da auch Luftverunreinigungen den Korrosionsverlauf beeinträchtigen und diese mit steigender Luftfeuchtigkeit besser an den feuchten Metalloberflächen haften können.

Für die Metalllegierung Bronze wird bei ERHARDT bereits eine relative Luftfeuchte von 46% rH[101] als kritische Luftfeuchte für die Korrosion genannt.

Holz

Zur Betrachtung des optimalen Raumklimas für hölzerne Bauteile wird die Ausführung von KEYLWERTH herangezogen. Der Autor nennt für ein schadensfreies Raumklima folgende Werte[102]:

- 10°C und 50 bis 70% rH
- 20°C und 50 bis 75% rH
- 30°C und 75% rH

Aus allen genannten Werten ergäbe sich ein sehr kleiner Bereich an optimaler Lufttemperatur (10 bis 15°C) und relativer Luftfeuchte (50 bis 60% rH), der für alle Materialien und Einrichtungsgegenstände in unbeheizten Gebäuden alter Bauart gelten würde. Diesen Bereich einzuhalten ist nicht möglich. Daher muss für jedes Gebäude in Abstimmung mit Denkmalpflegern, Restauratoren und Nutzern ein "optimales" Raumklima gefunden werden. Hierzu müssen von allen Beteiligten Schutzziele für das Gebäude und das Inventar definiert werden.

Durch Eintragung der Grenzwerte und Empfehlungen in ein Diagramm kann in Verbindung mit der Eintragung der Messwerte für die Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte festgestellt werden, in welchem Umfang Raumklimata eingetreten sind, die sich schädigend auf die Bausubstanz und die Einrichtungsgegenstände auswirken können.

[99] DIN EN ISO 8044:1999-11, S. 3.
[100] Neroth/Vollenschaar 2011, S. 737.
[101] Erhardt/Mecklenburg 1994, S. 35.
[102] Keylwerth 1969, S. 285ff.

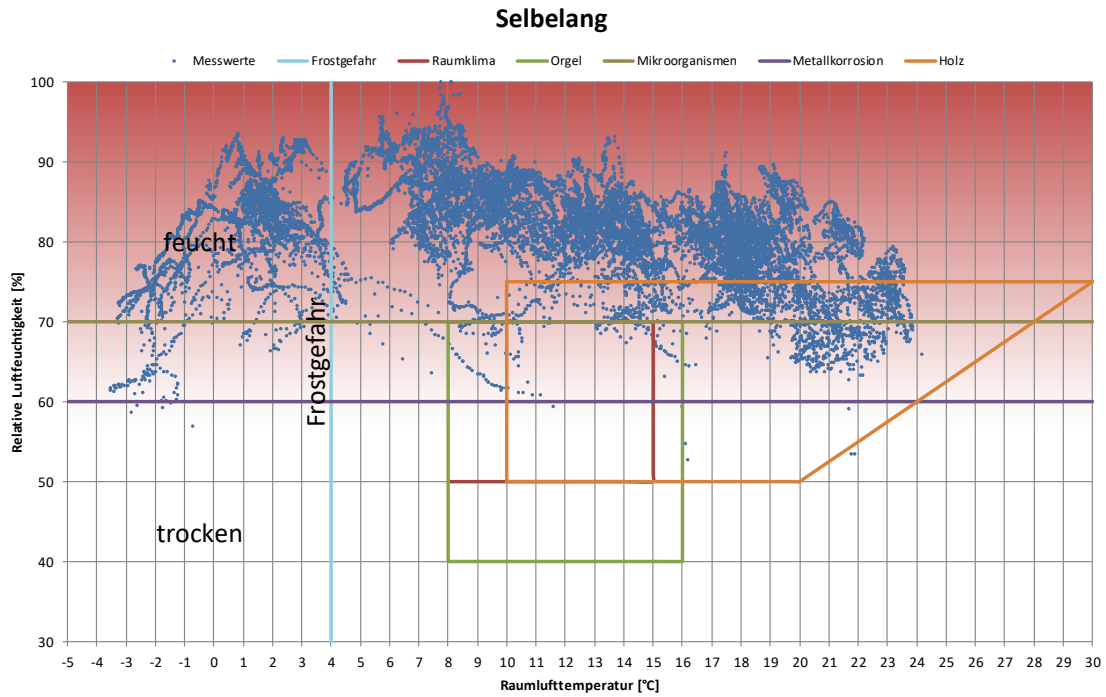


Abb. 6.14: Selbelang - Grenzwerte und Empfehlungen - Messwerte

Messwerte	Wertepaare Lufttemperatur und relative Luftfeuchte (blau)

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass sich bei der Kirche in Selbelang die Mehrzahl der Werte der Lufttemperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeiten außerhalb der empfohlenen Grenzwerte befindet.

7 Beantwortung der Forschungsfragen

Zur Beantwortung der in Kapitel 1.1 formulierten Forschungsfragen:

- Wie kann Sommerkondensation vom Nutzer der Kirche erkannt und diagnostiziert werden?
- Welche Kirchen sind in besonderem Maß der Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation ausgesetzt und anhand welcher Faktoren (Parameter) kann eine Vorhersage dazu getroffen werden, ob Sommerkondensation auftreten wird?
- Mit welchen Maßnahmen kann Sommerkondensation vermieden bzw. reduziert werden?

werden nachfolgend die Auswertungen der Messungen zusammengefasst und beantwortet.

Es wird ein Vergleich der Kirchen durchgeführt, Unterschiede und Gemeinsamkeiten werden herausgestellt sowie die Einflüsse für das Auftreten von Sommerkondensation erforscht. Es wird untersucht, ob diese Einflüsse Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sommerkondensation zulassen. Dies dient dazu kostenintensive, unangemessene und für das Bauwerk unzuträgliche Maßnahmen zu vermeiden.

Die möglichen Einflüsse sind:

- Außen- und Innenklima
- Lage
- Bauzeit bzw. Errichtungszeit
- Bauliche Eigenschaften
- Nutzung

Das Klima und die Nutzung der Kirche sind veränderliche Parameter. Das heißt, dass diese sich jahreszeitlich bzw. aufgrund von Veranstaltungen ändern. Das Außenklima kann nicht verändert werden. Die Lage der Kirche ist unveränderlich.
Die Aufnahme der Bauzeit in die Untersuchung betrifft lediglich die Dicke der Außenwand, da bei älteren Gebäuden die Außenwände in einer größeren Dicke hergestellt wurden als bei "neuzeitlicheren" Gebäuden (z.B. Kirche in Betzin und die Kirche der Pfingstgemeinde in Potsdam).

Wesentlich sind die baulichen Eigenschaften des Gebäudes, wie die Raumkubatur, das verwendete Baumaterial sowie die Anzahl und Größe der Fenster.

Folgende Tabelle stellt die baulichen Eigenschaften sowie die Lüftungs- und Beheizungsmöglichkeiten der Kirchen in einer Übersicht dar:

Tabelle 5:: Übersicht der baulichen Eigenschaften der Kirchen

Kriterien / Kirche	Ausrichtung	Baujahr	Kubatur in m³	Material Außenwand	Wanddicke in cm	Fenster in m²	Lüftungs-möglichkeiten	Beheizungs-möglickeiten
Badingen	Ost-West	2. H. 13. Jhrd.	832	Feldstein	128	45,0	Tür, Fenster	Bank
Betzin	Nord-Süd	1887	1026	Ziegel	85,5	42,0	Tür	-
Fahrland	Ost-West	1709	1006	Ziegel, verputzt	103	48,0	Fenster	-
Großmutz	Ost-West	1814/15	875	Feldstein	116	28,5	Tür, Fenster	-
Gutengermendorf	Ost-West	M. 13. Jhrd.	1120	Feldstein	95	34,6	Türen	Fußheizung
Hindenburg	Ost-West	2. H. 13. Jhrd.	582	Feldstein, verputzt	112	22,3	Tür, Fenster	-
Hoppenrade	Ost-West	1895	872	Ziegel	59	23,0	Tür	Einzelofen
Potsdam	Nord-Süd	1893	1308	Ziegel	67	22,7	Tür	Bank- u. Wand
Ribbeck	Ost-West	2. H. 13. Jhrd.	575	Feldstein	150	30,0	Tür	Einzelofen
Selbelang	Ost-West	1440	578	Ziegel	95	37,8	Tür, Fenster	Bank
Staffelde	Ost-West	2. H. 13. Jhrd.	523	Ziegel/Feldstein	92	16,8	Tür, Fenster	Bank
Storkow	Ost-West	2. H. 13. Jhrd.	935	Feldstein	108	33,0	Türen, Fenster	Bank

Ausgehend von der Definition, dass Sommerkondensation dann auftritt, wenn die Taupunkttemperatur von der Oberflächentemperatur unterschritten wird, ist die Frage zu beantworten, welche oben genannten Einflüsse sich auf diese beiden bauphysikalischen Parameter auswirken. Mit Hilfe der Abb. 5.1 wird jeder einzelne Einfluss auf seine Relevanz hin geprüft. Ziel ist es, herauszufinden, ob anhand der aufgeführten Einflüsse eine Vorhersage dazu getroffen werden kann, ob Sommerkondensation auftritt. Dabei ist es von Bedeutung, dass zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden im Sinne der denkmalgeschützten und historisch wertvollen Bausubstanz durchgeführt werden. Weiterhin soll mit möglichst geringem zeitlichen und finanziellem Aufwand geprüft werden, ob es in den jeweiligen Kirchen zu einer Sommerkondensation kommen kann. Aus diesem Grund werden die Parameter, die keinen oder wenig Messaufwand erfordern, primär geprüft.
Erst wenn die Kausalitäten für das Auftreten von Sommerkondensation bekannt sind, können geeignete Maßnahmen für deren Vermeidung bzw. Reduzierung durchgeführt werden.

Ausgehend von der in Abb. 5.1 dargestellten Grafik werden die Zusammenhänge, die zum Auftreten von Sommerkondensation führen in den folgenden Kapiteln dargestellt und anhand von Auswertungen erläutert. Zunächst wird eine Übersicht über Umfang und Größenordnung des Auftretens von Sommerkondensation in den einzelnen Untersuchungsobjekten vorangestellt.

Die Übersicht (s. Tabelle 6) dient der Darstellung, in welchem Umfang Sommerkondensation und Kapillarkondensation aufgetreten sind und welchen Anteil diese während des gesamten Messzeitraums einnehmen. Die angegebenen Werte wurden aus der Gesamtheit der Messergebnisse jeder einzelnen Kirche und der Auswertung der aufgetretenen Sommer- und Kapillarkondensation ermittelt.

Bei den "geosteten" Kirchen werden die Messpunkt Nord (N) und Süd (S) betrachtet; bei den "genordeten" Kirchen sind es die Messpunkte West (W) und Ost (O). Es wurden jeweils ein unterer Messpunkt (u) in ca. 10 cm über Oberkante Fußboden und ein oberer Messpunkt (o) in ca. 50 cm Höhe festgelegt. An diesen Stellen wurden die Oberflächentemperaturen gemessen.

Tabelle 6: Auftreten von Sommerkondensation und Kapillarkondensation während des Messzeitraums[103]

Kirche	Messpunkt							
	N-u SK	N-u KK	N-o SK	N-o KK	S-u SK	S-u KK	S-o SK	S-o KK
Badingen	0,07%	54,31%	0,01%	39,12%	0,00%	23,76%	0,00%	17,29%
Fahrland	0,05%	40,41%	0,05%	41,88%	0,06%	49,75%	0,13%	51,45%
Großmutz	1,07%	85,08%	0,42%	75,45%	1,88%	82,95%	0,43%	63,80%
Gutengermendorf	0,29%	59,75%	0,00%	39,76%	0,19%	42,79%	0,00%	27,79%
Hindenburg	1,35%	59,43%	0,28%	41,21%	0,71%	28,40%	0,06%	15,48%
Hoppenrade	2,96%	39,94%	2,55%	37,33%	2,58%	37,26%	2,12%	32,63%
Ribbeck	0,27%	53,81%	0,00%	50,08%	0,00%	52,61%	0,00%	37,23%
Selbelang	3,02%	82,27%	0,69%	86,41%	2,85%	78,63%	0,11%	77,02%
Staffelde	29,55%	96,82%	18,99%	87,84%	14,60%	88,47%	9,01%	81,87%
Storkow	0,00%	31,46%	0,00%	19,05%	0,07%	36,44%	0,00%	14,62%
	O-u SK	O-u KK	O-o SK	O-o KK	W-u SK	W-u KK	W-o SK	W-o KK
Betzin	0,00%	33,11%	0,00%	31,64%	0,00%	29,26%	0,00%	30,56%
Potsdam	0,00%	26,14%	0,00%	33,36%	0,01%	38,21%	0,00%	25,66%

Die auf eine geringere Wasserdampfsättigung bezogene Kapillarkondensation (KK) tritt weitaus häufiger auf als die Sommerkondensation. An den unteren Messpunkten ist der Anteil der Kondensation größer als an den oberen Messpunkten. Dies liegt darin begründet, dass die Wandoberfläche in Fußbodennähe im Regelfall kühler ist als im oberen Bereich.

Im Folgenden wird die Kapillarkondensation nicht weiter in die Betrachtungen einbezogen. Ist Feuchtigkeit nur adhäsiv an den Porenwänden gebundenen, so hat dies zumeist keinen schädlichen Einfluss auf die Bausubstanz. Um die Auswirkungen der Kapillarkondensation näher zu betrachten sind weitere umfangreiche Untersuchungen erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden konnten. So müssten beispielsweise durch baustoffliche Feststellungen die Porengrößen bestimmt werden, um die Wassertransportmechanismen zu differenzieren.

Es wird - soweit möglich - pro Kapitel eine "Rangreihenfolge" der Kirchen bestimmt. Diese

[103] Angaben in % bezogen auf den Messzeitraum

ist auf den jeweils betrachteten Einfluss bezogen und dem Auftreten von Sommerkondensation gegenübergestellt.

Zur Erstellung dieser "Rangreihenfolge" und der Darstellung der Zusammenhänge werden die prozentualen Werte der einzelnen Messpunkte aus Tabelle 6 addiert und mit einem, auf zwei Kommastellen, gerundeten Wert angegeben. Aus diesem wird in der folgenden Tabelle die Reihenfolge, beginnend mit der Kirche, in der am häufigsten Sommerkondensation aufgetreten ist, festgelegt. In den weiteren Aufstellungen werden die einflussnehmenden Parameter auf die Sommerkondensation in die Zusammenstellungen aufgenommen. Hierzu werden, wenn dies die Parameter zulassen, Verhältniszahlen gebildet, um einen Vergleich der Kirchen durchführen zu können.

Tabelle 7: Rangreihenfolge des Auftretens von Sommerkondensation (SK)[104]

Kirche	**SK_{gesamt} in %**
Staffelde (SF)	72,15
Hoppenrade (HO)	10,21
Selbelang (SE)	6,67
Großmutz (GM)	3,81
Hindenburg (HB)	2,40
Gutengermendorf (GU)	0,48
Fahrland (FA)	0,29
Ribbeck (RB)	0,27
Badingen (BA)	0,08
Storkow (ST)	0,07
Potsdam (PF)	0,01
Betzin (BE)	0,00

Weitere feuchterelevante Vorgänge durch aufsteigende Feuchtigkeit sowie hygroskopische Salze werden in die Bewertungen einbezogen, sofern sie der Beantwortung der Forschungsfragen dienlich sind.

7.1 Einfluss der Lage

Unter Lage wird hier einerseits die Ausrichtung des Gebäudes als auch die Einbindung der Kirche in die Umgebung und vor allem den Baumbewuchs und Gebäude in der Nähe der Kirche verstanden. Eine Kirche ist aus liturgischen Gründen in der Regel in West-Ost-Richtung errichtet worden. Dies wird umgangssprachlich auch als "geostet" bezeichnet. Als

[104] Die in den Grafiken verwendeten Abkürzung der Kirchen sind in Klammern angegeben. Die Kirchen in Nord-Süd-Ausrichtung sind **markiert**.

Grund hierfür ist die im Osten aufgehende Sonne zu nennen, die als Symbol der Auferstehung Jesu Christi gilt[105].
Für die Anordnung von Fenstern bedeutet dies, dass diese sich in der Regel im Chorbereich und auf der Nord- und Südseite der Kirche befinden. Auf der Westseite der Kirchen ist zumeist der Turm errichtet worden. Öffnungen, die sich in diesem befinden, tragen nicht zur Erwärmung des Innenraumes bei und werden bei der weiteren Betrachtung außer Acht gelassen.

7.1.1 Ausrichtung

Unter den zwölf untersuchten Kirchen sind zehn geostet und zwei Kirchen wurden in Nord-Süd-Richtung errichtet. Die Kirche in Betzin wurde 1887 aus "Platzgründen" auf den Fundamenten einer geosteten Kirche gebaut. Der longitudinale Dorfanger ließ ein größeres, geostetes Bauwerk nicht zu[106]. Die Kirche der Pfingstgemeinde in Potsdam wurde an das südöstlich gelegene Gemeindehaus 1893 angebaut und ließ ebenfalls keine Ost-West-Ausrichtung zu[107].

Wie in Tabelle 6 ersichtlich, ist Kondensation bei den Kirchen mit Ost-West-Ausrichtung häufiger aufgetreten als in den beiden Kirchen mit Nord-Süd-Ausrichtung. Bei den geosteten Kirchen ist eine Längsseite der Kirche dem Süden zugewandt. Bei den "genordeten" Kirchen befinden sich das Eingangsportal und der Turm im Süden. Eine Erwärmung der Längswände durch die Sonneneinstrahlung ist somit nicht gegeben. Ebenso sind keine solaren Wärmegewinne durch die Fenster zu verzeichnen (s. auch Kap. 7.3.3).

Die Rangreihenfolge der Kirchen, welche sich aus dem Einfluss der Ausrichtung der Kirche ergibt, ist analog zu der in Tabelle 7 zu sehen. Die beiden Kirchen mit Nord-Süd-Ausrichtung befinden sich an den letzten beiden Rangstellen.

Feststellung
Das Auftreten von Sommerkondensation hängt von der Ausrichtung der Kirche ab.

[105] Goecke-Seischab/Harz 2011, S. 12.
[106] Schwarz/Metzger 2003, S. 188.
[107] Kitschke/Grell 1994, S. 4.

7.1.2 Einfluss der Topografie

Unter dem Begriff "Topografie" wird die Erfassung der Oberfläche mit ihren wesentlichen natürlichen und künstlichen Objekten sowie sonstigen Erscheinungsformen verstanden[108]. Der Begriff wird in dieser Arbeit sinngemäß für das Gelände, die Bodennutzung, den Bewuchs und die umgebenden Bauwerke verwendet. Zur Betrachtung des Auftretens von Sommerkondensation sind der Baumbewuchs und die Bauwerke von Bedeutung.

Ein hoher Baumbestand mit dichtem Blätterwerk sorgt für eine Verschattung. Dadurch ist die Erwärmung der Außenmauern behindert und die solaren Wärmegewinne durch die Sonneneinstrahlung über die Fenster sind eingeschränkt. Dem gleichzusetzen sind höhere Bauwerke in der näheren Umgebung. Auf Grundlage des Aufmaßes der Kirchen, bei dem auch die topografischen Gegebenheiten erfasst wurden, konnte eine Einschätzung des Verschattungspotenzials vorgenommen werden. Zur Erfassung des Baumbestandes wurde der Kronendurchmesser bei vollständiger Belaubung durch ein Schrittmaß bestimmt.

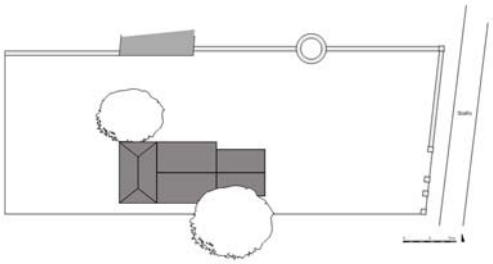
Jahreszeitlich bedingt treten selbstverständlich Änderungen bei dem Maß der Verschattung durch den Bewuchs auf. Es wird davon ausgegangen, dass zu der Jahreszeit, zu der Sommerkondensation auftritt, das Blätterwerk der Bäume in vollem Umfang ausgeprägt ist. Hier wird der "Extremfall" - das heißt bei vollem Bewuchs der Bäume - betrachtet.

Maßgeblich für die Betrachtung einer Verschattung ist in erster Linie die Südseite einer Kirche. Hier können wärmespeichernde Bauteile nicht erwärmt werden und leisten somit einen geringeren Beitrag zur Erwärmung des Kircheninneren. Gleiches gilt für die solaren Wärmegewinne durch verglaste Bauteile. Durch den Sonnenstand auf der Ostseite einer Kirche sind im Jahresverlauf keine nennenswerten solaren Wärmegewinne zu verzeichnen. Auf der Westseite befinden sich in der Regel das Eingangsportal der Kirchen und der Turm. Fenster sind dort seltener anzutreffen. Auch hat die "Dämpfung" durch den Eingangsbereich und die, vor den Zugang zum Kirchenraum eingebaute, Winterkirche für die Betrachtung der Verschattung von der Westseite keine Bedeutung. Aufgrund des Sonnenverlaufs ist die Verschattung der Nordseite durch die Kirche selbst gegeben[109].

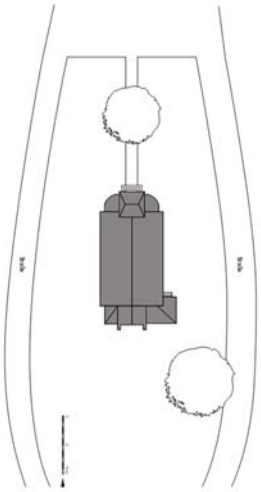
Im Allgemeinen sind Dorfkirchen als Solitäre auf dem sie umgebenden Grundstück errichtet worden. Eine Verschattung durch nahe gelegene Gebäude sind selten anzutreffen. Sollten diese dennoch vorhanden sein, so sind sie ihn ihrer Höhe der Kirche zumeist untergeordnet und bergen daher keine Verschattungsgefahr für das Kirchengebäude. Bei den betrachteten Kirchen waren keine Nebengebäude vorhanden, die Einfluss auf eine Verschattung hatten.

[108] Kohlstock 2011, S. 1.
[109] Diese Ausführungen betreffen nur "geostete" Kirchen.

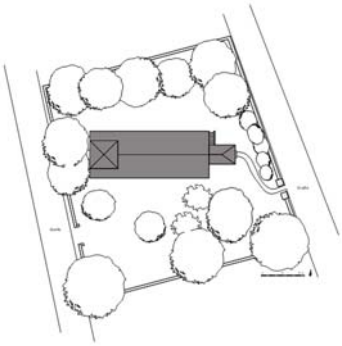
Abb. 7.1: Aufstellung der Kirchen und ihr Verschattungspotential[110]



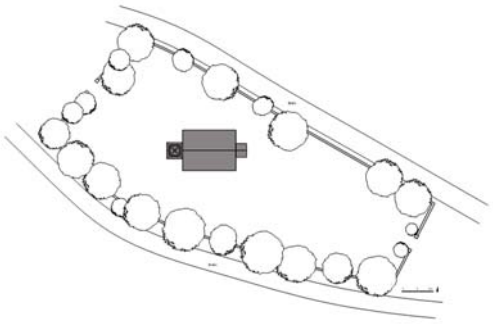
Badingen
mittlere Verschattung



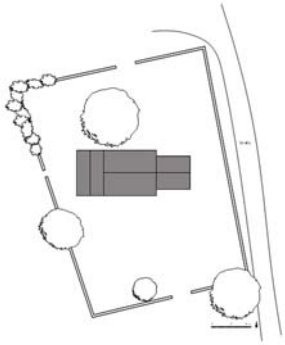
Betzin
geringe Verschattung



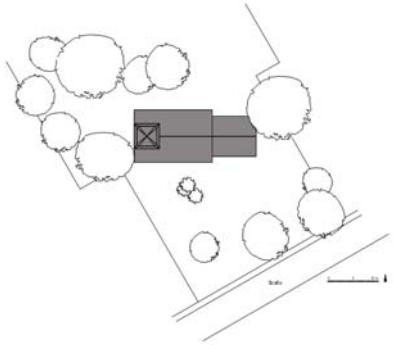
Fahrland
hohe Verschattung



Großmutz
hohe Verschattung

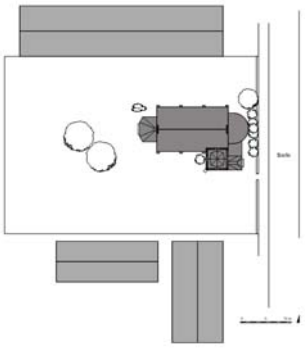


Gutengermendorf
keine Verschattung

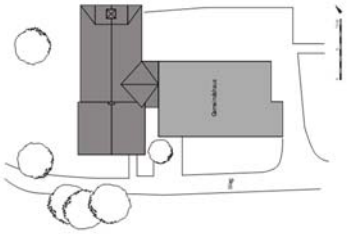


Hindenburg
mittlere Verschattung

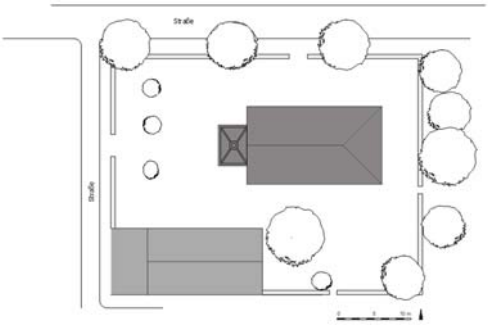
[110] Die Kirchen sind alphabetisch geordnet und die Lagepläne genordet. Die Lagepläne sind in Band 2 größer dargestellt.



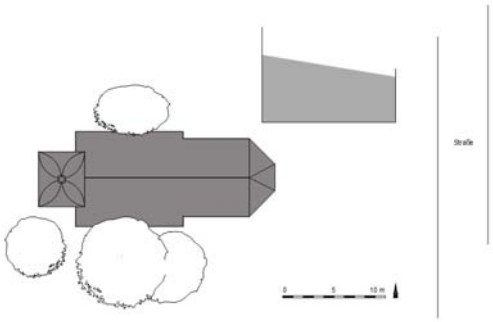
Hoppenrade
keine Verschattung



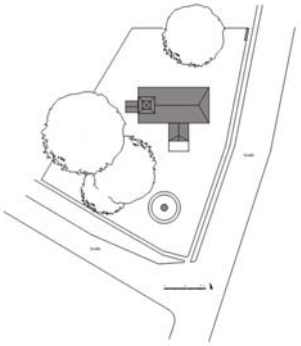
Potsdam
hohe Verschattung



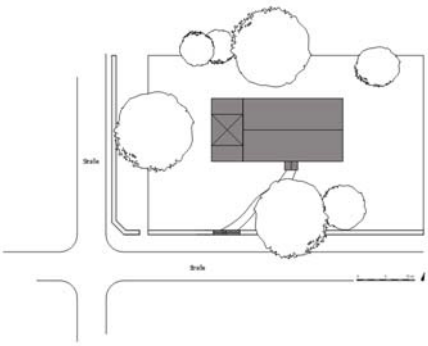
Ribbeck
hohe Verschattung



Selbelang
hohe Verschattung



Staffelde
hohe Verschattung



Storkow
hohe Verschattung

In tabellarischer Form ergibt sich folgende Aufstellung:

Tabelle 8: Übersicht der Kirchen - Verschattung und Sommerkondensation (SK)

Kirche	Verschattung	SK_{gesamt} in %
Staffelde	hoch	72,15
Hoppenrade	keine	10,21
Selbelang	hoch	6,67
Großmutz	hoch	3,81
Hindenburg	mittel	2,40
Gutengermendorf	keine	0,48
Fahrland	hoch	0,29
Ribbeck	hoch	0,27
Badingen	mittel	0,08
Storkow	hoch	0,07
Potsdam	hoch	0,01
Betzin	gering	0,00

In der Kirche in Staffelde, in der am häufigsten Sommerkondensation auftrat, ist das Verschattungspotential hoch. Auf dem nächsten Rang ist die Kirche in Hoppenrade zu finden, bei der keine Verschattung vorliegt. Auch im weiteren Verlauf der Tabelle lässt sich kein eindeutiger Rückschluss auf einen Zusammenhang zwischen der Verschattung und dem Auftreten von Sommerkondensation ziehen. Allerdings hat die Verschattung Einfluss auf die Erwärmung der Außenbauteile (s. Kap. 7.3.1).

Feststellung
Zur Beurteilung, ob die "Topografie" - insbesondere die Verschattung - Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation hat, muss im Weiteren geprüft werden, ob diese die Erwärmungseigenschaft der Außenwände beeinflusst.

Einfluss der Lage - Resümee

Aufgrund der Lage der Kirchengebäude innerhalb eines Ortes, der sie umgebenden "Topografie" und deren Ausrichtung lässt sich feststellen, dass diese ohne weitere Kenntnis anderer Einflussparameter nicht eindeutig Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation zulassen. Es kann jedoch abgeleitet werden, dass Kirchen, bei denen die Lageparameter eine schnelle Erwärmung der Außenwände zulassen in geringerem Ausmaß gefährdet sind.

7.2 Einfluss der Bauzeit

Die Bau- bzw. Errichtungszeit der Kirche hat im Wesentlichen Einfluss auf die Dicke und das verwendete Material der Außenwände (s. Kap. 7.3). Mit Hilfe der nachstehenden Tabelle soll die Frage beantwortet werden, ob anhand der Errichtungszeit der Kirche Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation gezogen werden können.

Tabelle 9: Übersicht der Kirchen - Bauzeit und Sommerkondensation (SK)

Kirche	Bauzeit	SK_{gesamt} in %
Staffelde	Ende 15. Jhd.	72,15
Hoppenrade	1895	10,21
Selbelang	1440	6,67
Großmutz	1814/15	3,81
Hindenburg	2. H. 13. Jhd.	2,40
Gutengermendorf	Mitte 13. Jhd.	0,48
Fahrland	1709	0,29
Ribbeck	2. H. 13. Jhd.	0,27
Badingen	2. H. 13. Jhd.	0,08
Storkow	2. H. 13. Jhd.	0,07
Potsdam	1893	0,01
Betzin	1887	0,00

Festzustellen ist, dass bei den beiden genordeten Kirchen (Potsdam und Betzin) - die beide Ende des 19. Jahrhunderts errichtet wurden - keine bzw. nur zu einem geringen Teil Sommerkondensation aufgetreten ist. Bei der ebenfalls Ende des 19. Jahrhunderts erbaute Kirche in Hoppenrade trat jedoch zu einem größeren Teil Sommerkondensation auf. In den Kirchen aus dem 13. und 14. Jahrhundert ist Sommerkondensation zu verzeichnen.

Bei der Kirche in Hoppenrade müssen möglicherweise andere Einflussgrößen für den hohen Prozentsatz der Sommerkondensation verantwortlich sein.

Einfluss der Bauzeit - Resümee

Aus der Errichtungszeit der Kirche lassen sich keine Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation ziehen. Es kann keine eindeutige Feststellung dazu getroffen werden, dass "ältere" Kirchen anfälliger für das Auftreten von Sommerkondensation sind als "jüngere" Kirchen - und umgekehrt.

7.3 Einfluss der baulichen Eigenschaften

Unter den baulichen Eigenschaften, die Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation nehmen können, seien hier

- die Dicke der Außenwand,
- das verwendete Baumaterial für die Außenwände,
- die Bauteiloberfläche im Inneren der Kirchen,
- die Anzahl, Größe und Lage der Fenster und
- das Raumvolumen (Kubatur) des Innenraums

genannt.

7.3.1 Dicke der Außenwand

Die Dicke der Außenwand, die sich überwiegend mit der Errichtungszeit der Kirche begründen lässt, ist maßgeblich für die Erwärmung der Wand. Als Stichpunkt für das Maß der Erwärmung sei hier der Begriff des Wärmedurchgangs angeführt. Dieser wird im Wärmedurchgangskoeffizienten U [W/m²K] ausgedrückt und ist ein Maß für die wärmedämmende Qualität eines Bauteils. Er ergibt sich aus dem Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R_T [m²K/W]. Dieser wird als Gesamtwiderstand beschrieben, den ein Bauteil und die oberflächennahen Luftschichten dem Wärmedurchgang entgegensetzen.[111] In die Berechnung fließen die Dicke des Bauteils [m] und die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] ein. Die Dicke der Außenwand kann durch ein Aufmaß bestimmt werden. Eine Aussage zur Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe lässt der zumeist inhomogene Aufbau einer dicken Kirchenmauer - ohne eine zerstörende Untersuchung - nicht zu. Eine Berechnung des U-Wertes ist demnach nur als Grenzwertbetrachtung mit Hilfe von Näherungswerten aus Tabellenwerken möglich. Ebenso ist die Bestimmung der Wärmespeicherfähigkeit C [kJ/K] der Wände auf Grund der Unkenntnis baustoffspezifischer Kennwerte nur begrenzt möglich. Kurz ausgedrückt: Eine Beschreibung der Außenwand einer Kirche ist mit bauphysikalischen Kennwerten nicht exakt möglich. Insofern dient die vorgenommene Berechnung des U-Wertes nur der hypothetischen Betrachtung und müsste durch eine - das Bauteil zerstörende - Maßnahme (Kernbohrungen) und einer baustofflichen Analyse verifiziert werden. Mit Hilfe dieser umfangreichen und kostenintensiven baustoffanalytischen Untersuchungen könnte festgestellt werden, welche Kenndaten der Baustoff aufweist. Im Sinne einer denkmalverträglichen Untersuchung sollten diese Analysen unterlassen bleiben.

[111] Schild/Willems 2011, S. 68.

Für die beispielhafte Betrachtung der U-Werte der Außenmauern der Kirche wurden die Tabellenwerte aus BUSS[112], herangezogen. Mit Hilfe der dort aufgeführten materialspezifischen Wärmeleitfähigkeitszahl λ und unter Zugrundelegung der standardisierten Wärmeübergangszahlen R_{se} und R_{si} wurde mit einer Berechnungssoftware der U-Wert berechnet. Die maßgebliche Einflussgröße bei der Berechnung des U-Wertes stellt die Dicke des Mauerwerks dar. Soweit die Putzdicken nicht bekannt sind und auf Grund der Maßgabe einer zerstörungsfreien Untersuchung nicht festgestellt werden konnten, wurde eine übliche Putzdicke von 2 cm für die Berechnung angesetzt. Eine Überprüfung durch abweichende Putzdicken hat ergeben, dass sich der U-Wert auf Grund der erheblichen Mauerwerksdicken nur im zweiten Nachkommabereich verändert. Die Dicke und die Zusammensetzung des Putzauftrags können daher vernachlässigt werden.

Baustoff	**Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK**
Putz aus Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	0,87
Ziegelmauerwerk (Rohdichte 2000 kg/m³)	0,96
Feldsteinmauerwerk (kristalline, metamorphe Gesteine)	3,50

Die Berechnung des U-Wertes erfolgte mit folgender Formel:

Formel 7.1

$$U = \frac{1}{0{,}13 + \frac{d_{Innenputz}}{\lambda_{Innenputz}} + \frac{d_{Mauerwerk}}{\lambda_{Mauerwerk}} + \frac{d_{Außenputz}}{\lambda_{Außenputz}} + 0{,}04} \; [W/m^2K]$$

U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m²K
d	Dicke des Baustoffes	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
0,13	Wärmeübergangswiderstand innen	m²K/W
0,04	Wärmeübergangswiderstand außen	m²K/W

Für die Festlegung der Rangreihenfolge wurden Verhältniszahlen aus dem U-Wert der Außenmauer und dem Auftreten von Sommerkondensation gebildet.

[112] Buss 2002, S. 584-600.

Beispiel - Kirche in Hoppenrade:

$$\frac{\text{SK}}{\text{U}-\text{Wert}} = \frac{10{,}21}{1{,}27} = 8{,}04$$

Tabelle 10: Rangreihenfolge bezogen auf die U-Werte in W/m²K

Kirche	Material	Dicke	U-Wert	SK_{gesamt} in %	SK/U-Wert
Staffelde	Ziegel/Feldstein	92 cm	0,89	72,15	81,08
Hoppenrade	Ziegel	59 cm	1,27	10,21	8,04
Selbelang	Ziegel	95 cm	0,83	6,67	8,04
Großmutz	Feldstein	116 cm	1,93	3,81	1,97
Hindenburg	Feldstein, verputzt	112 cm	1,94	2,40	1,24
Fahrland	Ziegel, verputzt	103 cm	0,92	0,29	0,32
Gutengermendorf	Feldstein	95 cm	2,18	0,48	0,22
Ribbeck	Feldstein	150 cm	1,62	0,27	0,17
Badingen	Feldstein	128 cm	1,81	0,08	0,04
Storkow	Feldstein	108 cm	2,02	0,07	0,03
Potsdam	Ziegel	69 cm	1,44	0,01	0,01
Betzin	Ziegel	85,5 cm	0,94	0,00	0,00

Auf Grund der wesentlich schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Feldsteinmauerwerks errechnen sich bei diesen Gebäuden höhere U-Werte als bei Kirchen mit Ziegelmauerwerk.

Feststellung
Anhand der U-Werte lassen sich keine Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation ziehen.

Eine weitere bauphysikalische Größe für das wahrscheinliche Auftreten von Sommerkondensation ist - neben der relativen Luftfeuchte und der Oberflächentemperatur - die Raumlufttemperatur. Anhand der folgenden Grafik wurde geprüft, ob die Mauerwerksdicke Einfluss auf die Entwicklung der Raumlufttemperatur nimmt. Zunächst wird deutlich, dass Kirchen mit geringerer Dicke der Außenmauer höhere Temperaturen im Innenraum aufweisen.

Ein Vergleich der jahreszeitlichen Entwicklung der Raumlufttemperatur (s. Abb. 7.6) mit den Mauerdicken veranschaulicht dahingegen, dass die Temperatur in Inneren der Kirche nicht von der Dicke der Außenwände abhängt. Höhere Temperaturen ergeben sich aus den unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen der beiden Messzeiträume (s. Kap. 7.4).

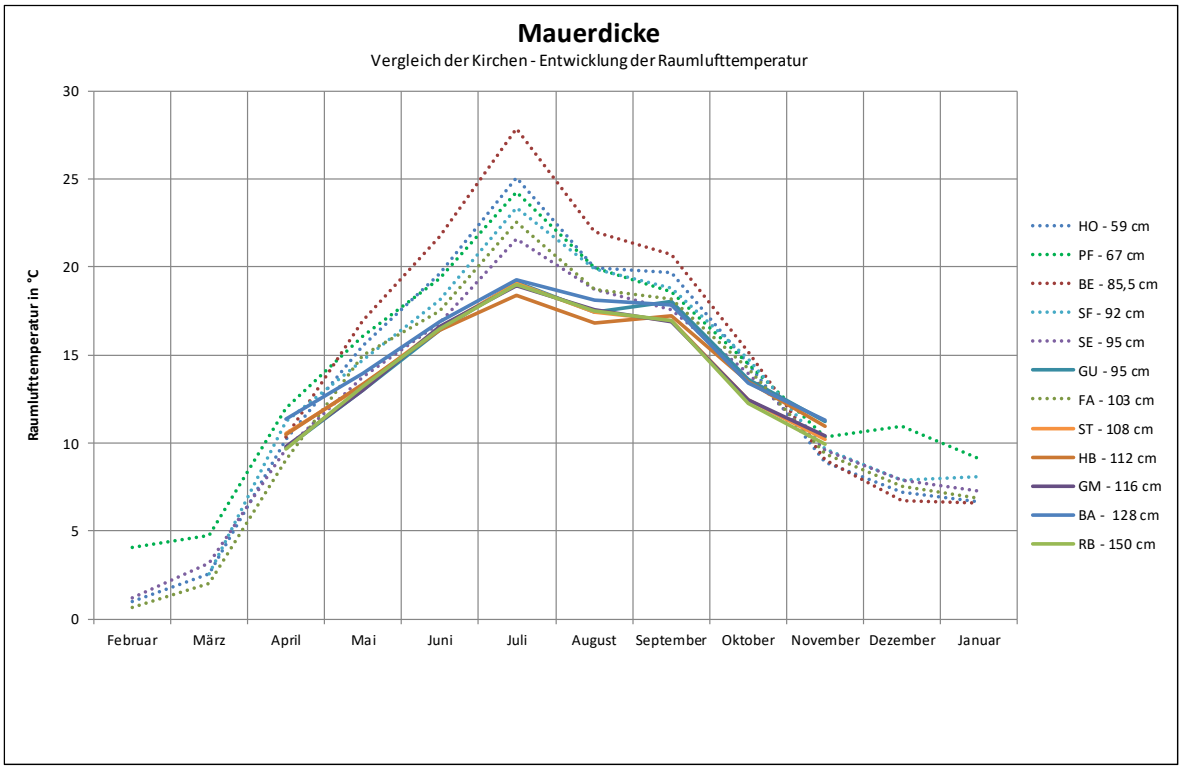


Abb. 7.2: Vergleich der Dicke der Außenmauer und die Entwicklung der Raumlufttemperatur[113]

Feststellung
Die Entwicklung der Raumlufttemperatur (Erwärmung) hängt nicht von der Dicke der Außenmauer ab.

Da weder durch die Kenntnis des U-Wertes noch über die Raumlufttemperaturen eindeutige Vorhersagen über den Einfluss der Mauerwerksdicke auf das Auftreten von Sommerkondensation getroffen werden können, wird im Weiteren eine Verhältniszahl aus der Dicke der Außenmauer und der Häufigkeit der Sommerkondensation gebildet, um gegebenenfalls weitere Feststellungen treffen zu können.

Beispiel - Kirche in Hoppenrade:

$$\frac{SK}{MD} = \frac{10{,}21}{59} \cdot 100 = 17{,}31$$

Bezogen auf diese Verhältniszahl aus dem Auftreten von Sommerkondensation (SK) und der Mauerwerksdicke (MD) ergibt sich nachstehende Reihenfolge der Kirchen.

[113] Die jeweiligen Kirchen innerhalb eines Messzeitraums sind mit durchgezogenen (2005) bzw. gepunkteten (2006) Linien dargestellt. Die Reihenfolge der Kirchen ist nach der Dicke der Außenmauer geordnet.

Tabelle 11: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation (SK)/Mauerdicke (MD)

Kirche	SK_{gesamt} in %	MD	SK/MD
Staffelde	72,15	92 cm	78,43
Hoppenrade	10,21	59 cm	17,31
Selbelang	6,67	95 cm	7,02
Großmutz	3,81	116 cm	3,28
Hindenburg	2,40	112 cm	2,14
Gutengermendorf	0,48	95 cm	0,51
Fahrland	0,29	103 cm	0,28
Ribbeck	0,27	150 cm	0,18
Badingen	0,08	128 cm	0,06
Storkow	0,07	108 cm	0,06
Potsdam	0,01	69 cm	0,01
Betzin	0,00	85,5 cm	0,00

Ein Zusammenhang zwischen der Dicke des Außenmauerwerks und dem Auftreten von Sommerkondensation lässt sich aus dieser Aufstellung nicht ableiten.

Feststellung
Das Auftreten von Sommerkondensation hängt nicht von der Dicke der Außenmauer ab.

7.3.2 Baumaterial

Die untersuchten Kirchen wurden aus unterschiedlichen Baumaterialien errichtet. Die Außenmauern bestehen aus Feldsteinen, Ziegelmauerwerk oder einem inhomogenen Mauerwerk aus Feldsteinen und Ziegelmauerwerk. Zwei der Kirchen sind mit einem Außenputz versehen (Fahrland und Hindenburg).

Tabelle 12: Baumaterial der Außenmauern - Auftreten von Sommerkondensation (SK)

Kirche	Material	SK_{gesamt} in %
Staffelde	Ziegel/Feldstein	72,15
Hoppenrade	Ziegel	10,21
Selbelang	Ziegel	6,67
Großmutz	Feldstein	3,81
Hindenburg	Feldstein, verputzt	2,40
Gutengermendorf	Feldstein	0,48
Fahrland	Ziegel, verputzt	0,29
Ribbeck	Feldstein	0,27
Badingen	Feldstein	0,08
Storkow	Feldstein	0,07
Potsdam	Ziegel	0,01
Betzin	Ziegel	0,00

Aus den verwendeten Baumaterialien für das Außenmauerwerk lassen sich keine Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation schließen. Dies wird aus den Ausführungen der vorangegangenen Kapitel ebenfalls deutlich.

Die beiden genordeten Kirchen (Potsdam und Betzin) wurden aus Ziegelmauerwerk errichtet, jedoch ist in diesen Kirchen kaum oder gar keine Sommerkondensation aufgetreten. In den ebenfalls ausschließlich aus Ziegeln gebauten Kirchen in Hoppenrade und Selbelang ist dagegen Sommerkondensation mit einer hohen Häufigkeit aufgetreten.

Feststellung
Allein mit der Kenntnis des Baumaterials des Mauerwerks lassen sich keine Rückschlüsse auf das Auftreten von Sommerkondensation ziehen.

Die Bauteiloberflächen der Außenmauern im Inneren der Gebäude sind verputzt. Da eine zerstörungsfreie Untersuchung der verwendeten Putze bzw. der Wandfassung nicht ohne stellenweise Abtragung möglich ist, kann zu deren Zusammensetzung keine konkrete Aussage getroffen werden. Bei den Kirchen, bei denen auf Grund der bereits vorhandenen Schädigung eine weitergehende, zerstörungsfreie Probenentnahme möglich war, wurden ergänzende Untersuchungen bzw. Messungen durchgeführt. Hierbei wurden die Sorptionsisothermen der Baustoffproben bestimmt.

In einem sogenannten Klimaschrank wurden Temperaturen von 10°C und 20°C erzeugt und mit Hilfe von gesättigten Salzlösungen bestimmte Luftfeuchtigkeiten eingestellt (s. Kap. 5.2.2 und 5.3). Diese waren:

bei 10°C ⇨ 62,7%, 78,8% und 96,8% rH
bei 20°C ⇨ 53,2%, 76,7% und 98% rH

Diese Bereiche der Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeiten sind mit dem gemessenen Raumklima in den untersuchten Kirchen vergleichbar.

Außerdem wurden die Baustoffproben einer Wasserlagerung unterzogen, um festzustellen, welche Menge an Wasser maximal von dem Material aufgenommen werden kann. Dieser Vorgang - die ständige Aufnahme von 100% Luftfeuchtigkeit - ist in den Kirchen nicht anzutreffen. Daher wird im Folgenden auf die Darstellung der Wasserlagerung in den Diagrammen vernachlässigt.

Beispielhaft wird die Auswertung bei Proben aus der Kirche Staffelde aufgezeigt. Es konnten drei Baustoffproben für die Bestimmung der Sorptionsisothermen entnommen werden. Dies waren:

Kurzbezeichnung	Material
SF-1	Putz
SF-2	Putz mit Mauerwerk
SF-3	Lehmputz

Aus Abb. 7.3 wird deutlich, dass sich die Masse der Proben auf maximal 4,2 Masse-% (Lehmputz) erhöht hat. Die Isothermen geben den Gleichgewichtszustand der feuchten Luft (bei einer bestimmten Luftfeuchtigkeit) und dem Wassergehalt im Baustoff bei einer definierten Temperatur an. Da sich in einer Kirche weder eine gleichbleibende Temperatur noch eine einheitliche relative Luftfeuchte einstellt, ist die Erstellung einer Sorptionsisotherme nicht nur eine baustoffzerstörende Messmethode, sondern sie ist auch sehr zeitaufwändig.

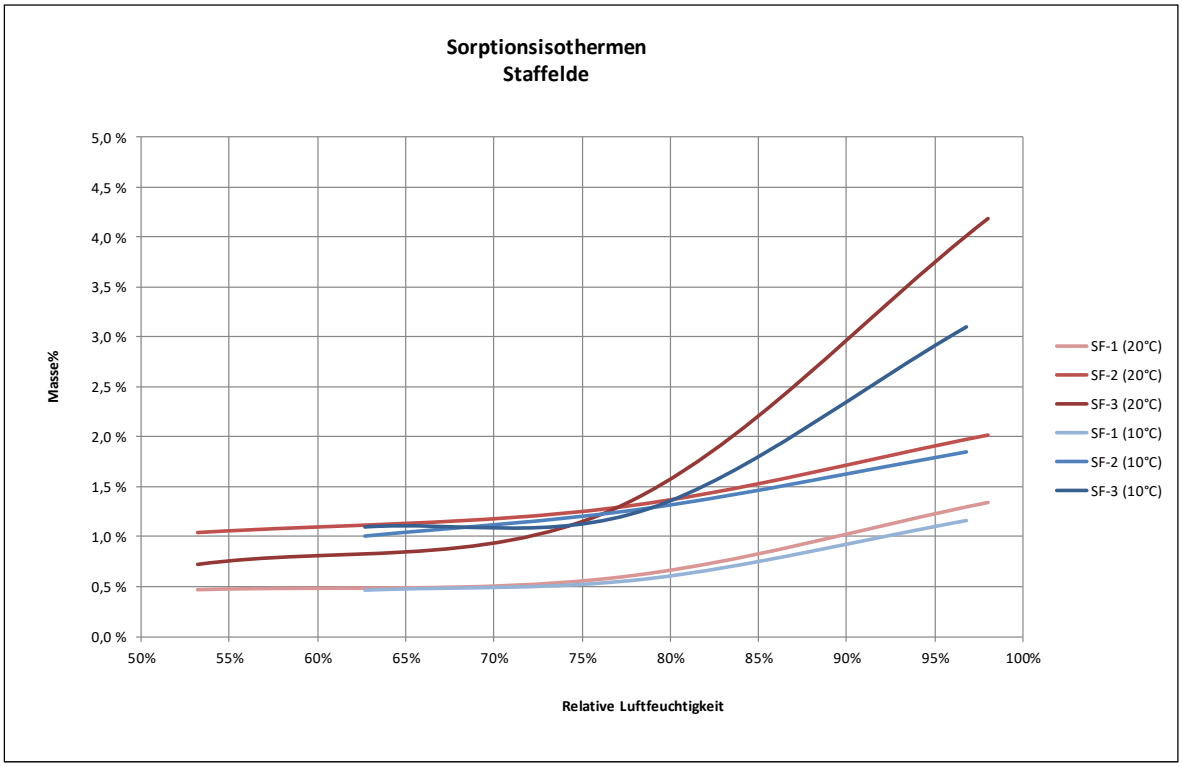


Abb. 7.3: Sorptionsisotherme Staffelde

Bei den weiteren Kirchen ergab die Auswertung der Sorptionsisothermen ebenfalls einen maximalen Wert der Masseprozente von 4,2%. Zum weit überwiegenden Teil liegen die Werte jedoch darunter.

Wie viel Feuchtigkeit von einem Baustoff aufgenommen wird, hängt auch von dem Gehalt an hygroskopisch wirkenden Salzen im Baustoffgefüge ab. Aus diesem Grund sind Salzanalysen der Proben angeraten, um eine eindeutige Aussage über die Wasseraufnahmefähigkeit eines Materials vornehmen zu können.

Feststellung
Allein die Kenntnis der Sorptionsisotherme eines Baustoffes lässt keinen Rückschluss zu, ob die Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation gegeben ist.

7.3.3 Fensterflächen

Neben der Verschattung durch den umgebenden Baumbewuchs haben auch die Anzahl und Größe der Fenster, deren Ausrichtung (Himmelsrichtung) und der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Scheiben Einfluss auf die solaren Wärmegewinne für den Kircheninnenraum. Der g-Wert einer Scheibe wird durch die Summe aus Strahlungstransmission und sekundärer Wärmeabgabe nach innen definiert[114]. Ein exakter Wert hierfür kann, aus Unkenntnis der Eigenschaften der, in die Kirchen eingebauten, Verglasung nicht angegeben werden. Anhaltswerte sind in Tabellenwerken oder in DIN-Normen zu finden. In DIN 4108-4 wird für eine Einfachverglasung ein g-Wert von 0,87[115] genannt. Dies bedeutet, dass 87% der Sonnenenergie durch die Verglasung hindurchtreten kann.

Treten Wärmeverluste durch die Fenster von innen nach außen auf, so wird dieser mit dem U_g-Wert (Wärmedurchlasskoeffizient des Glases) gekennzeichnet. Der U_g-Wert gibt an, welche Menge an Wärmeenergie (Watt) durch ein opakes Bauteil bezogen auf einen Quadratmeter je Grad Kelvin (K) Temperaturdifferenz von innen nach außen hindurchtritt. Die Einheit wird in W/(m²K) angegeben. Auch dieser Wert ist bei einem Fenster alter Bauart schwer zu bestimmen, da er sich neben der Verglasung auch auf den, ebenfalls schwer festzustellenden, Wert des Rahmenanteils (U_f) bezieht.

Es wird davon ausgegangen, dass für die eingebauten Fenster in einer Kirche eine Einfachverglasung verwendet wurde. Maßgeblich für die weitere Bewertung wird der Fensterflächenanteil in Quadratmetern herangezogen.

Analog der Dicke der Außenmauern wird für die Festlegung einer Rangreihenfolge die Verhältniszahl zwischen dem Fensterflächenanteil der sonnenexponierten Fenster und dem Auftreten von Sommerkondensation gebildet. Bei den geosteten Kirchen sind dies die Süd- und Ostfenster. Bei den genordeten Kirchen werden die Süd-, West- und Ostfenster zur

[114] Pech u.a. 2005, S. 65.
[115] DIN 4108-4:2013-02, S. 31.

Berechnung herangezogen. Die folgende Aufstellung weicht daher von den in Kapitel 1.3 genannten Fensterflächen ab.

Beispiel - Kirche in Hoppenrade:

$$\frac{\mathrm{SK}}{\mathrm{FF}} = \frac{10{,}21}{12{,}4} \cdot 100 = 82{,}34$$

Bezogen auf diese Verhältniszahl aus dem Auftreten von Sommerkondensation (SK) und der Fensterfläche (FF) ergibt sich folgende Rangreihenfolge der Kirchen.

Tabelle 13: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation (SK)/Fensterfläche (FF)

Kirche	SK_{gesamt} in %	FF	SK/FF
Staffelde	72,15	7,6 m²	949,47
Hoppenrade	10,21	12,4 m²	82,34
Selbelang	6,67	25,2 m²	26,47
Hindenburg	2,40	11,8 m²	20,34
Großmutz	3,81	19,0 m²	20,05
Gutengermendorf	0,48	21,1 m²	2,27
Ribbeck	0,27	20,0 m²	1,35
Fahrland	0,29	24,0 m²	1,21
Storkow	0,07	14,4 m²	0,49
Badingen	0,08	27,0 m²	0,30
Potsdam	0,01	21,0 m²	0,05
Betzin	0,00	42,0 m²	0,00

Ein hoher Fensterflächenanteil lässt einen hohen solaren Wärmegewinn erwarten, der wiederum Einfluss auf das Raumklima nimmt. Eine große Fensterfläche ist für eine schnellere Erwärmung des Innenraums verantwortlich. Die Folge ist eine Änderung des Raumklimas hinsichtlich der Raumlufttemperaturen und der relativen Luftfeuchte. Zudem wird durch die Erhöhung der Temperatur eine Anhebung der Oberflächentemperaturen erreicht und damit der Taupunktabstand vergrößert. Die Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation sinkt demzufolge.

In den Kirchen mit den geringeren Fensterflächenanteilen ist am häufigsten Sommerkondensation aufgetreten. Jedoch ist auch in der Kirche zu Selbelang mit einer größeren Fensterfläche Sommerkondensation zu verzeichnen. Bei den drei letztplatzierten Kirchen, die über eine große Fensterfläche verfügen, ist kaum bzw. keine Sommerkondensation feststellbar. Es lässt sich also ein Zusammenhang zwischen den Fensterflächen und dem Auftreten von Sommerkondensation herstellen. Nach ROLOFF wird "in Gebäuden mit einem hohen Anteil an Fensterflächen die direkte Sonneneinstrahlung über die Anhebung der Raumlufttemperatur zu erheblichen Schwankungen der relativen Raumluftfeuchte führen"[116].

[116] Roloff u.a. 2009, S. 19.

Feststellung
Das Auftreten von Sommerkondensation hängt von der Größe der sonnenexponierten Fensterfläche ab.

7.3.4 Einfluss des Raumvolumens

Die Kubatur des Innenraums eines Gebäudes wirkt sich auf das Raumklima aus. Je größer der Raum, desto eher können Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Raumlufttemperatur ausgeglichen werden. Dies liegt darin begründet, dass Räume mit großer Kubatur über größere Baustoffoberflächen verfügen, die als Feuchtepuffer wirken können. Eine hohe Luftfeuchtigkeit wird im Baustoff gespeichert und zeitverzögert - bei einem Absinken der relativen Luftfeuchte - wieder an den Raum abgegeben.

Entsprechend Tabelle 11 und Tabelle 13 wird für die folgende Tabelle eine Verhältniszahl aus dem Raumvolumen und dem Auftreten von Sommerkondensation gebildet.

Beispiel - Kirche in Hoppenrade:

$$\frac{\mathrm{SK}}{RV} = \frac{10{,}21}{872} \cdot 100 = 1{,}17$$

Bezogen auf diese Verhältniszahl aus Raumvolumen (RV) und dem Auftreten von Sommerkondensation (SK) ergibt sich folgende Rangreihenfolge der Kirchen.

Tabelle 14: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation (SK)/Raumvolumen (RV)

Kirche	RV in m³	SK_{gesamt} in %	SK/RV
Staffelde	523	72,15	13,80
Hoppenrade	872	10,21	1,17
Selbelang	578	6,67	1,15
Hindenburg	582	2,40	0,41
Großmutz	875	3,81	0,34
Gutengermendorf	1120	0,48	0,08
Ribbeck	575	0,27	0,05
Fahrland	1006	0,29	0,03
Storkow	935	0,07	0,01
Badingen	832	0,08	0,01
Potsdam	1308	0,01	0,00
Betzin	1026	0,00	0,00

Bei den - bezogen auf das Raumvolumen - kleineren Kirchen ist häufiger Sommerkondensation aufgetreten als bei den Kirchen mit größerer Kubatur. Gebäude mit einem großen Raumvolumen verfügen über größere Flächen, die Feuchtigkeit aus der Raumluft aufnehmen können. Hier kommen nicht nur mineralische Baustoffe, sondern beispielsweise auch

hölzerne Einbauten und selbst Sitzbankauflagen in Frage. Durch die Adsorption und Absorption der anfallenden Feuchte durch diese Materialien reagiert das Raumklima bei großen Raumvolumina träger.

Feststellung
Die Häufigkeit der Sommerkondensation hängt vom Raumvolumen der Gebäude ab.

Einfluss der baulichen Eigenschaften - Resümee

Weder die Dicke der Außenmauern, noch das Baumaterial der Wände und des Innenputzes lassen Rückschlüsse auf die Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation zu. Dahingegen hat die Fensterfläche und die Kubatur eines Gebäudes Einfluss auf die Häufigkeit der Sommerkondensation.

7.4 Einfluss des Klimas

Da die Wetterverhältnisse in den Jahren 2005 und 2006, in denen Messungen in den Kirchen durchgeführt wurden, sehr unterschiedlich war, wird eine Übersicht der durchschnittlichen monatlichen Klimawerte den Schlussfolgerungen vorangestellt. Dementsprechend lässt sich die Entwicklung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte nachvollziehen.

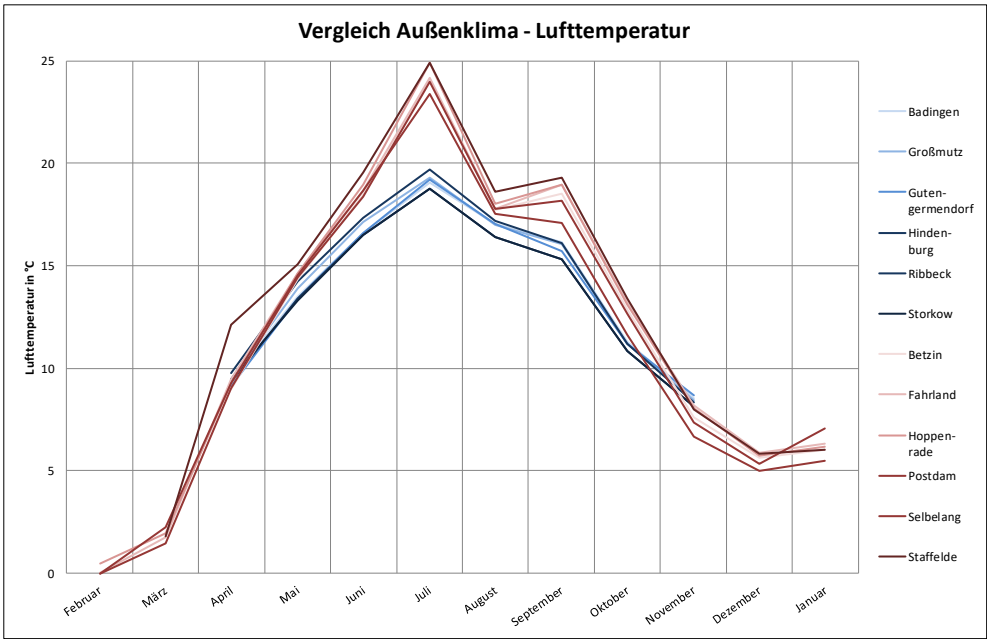


Abb. 7.4: Außenklima - Lufttemperatur[117]

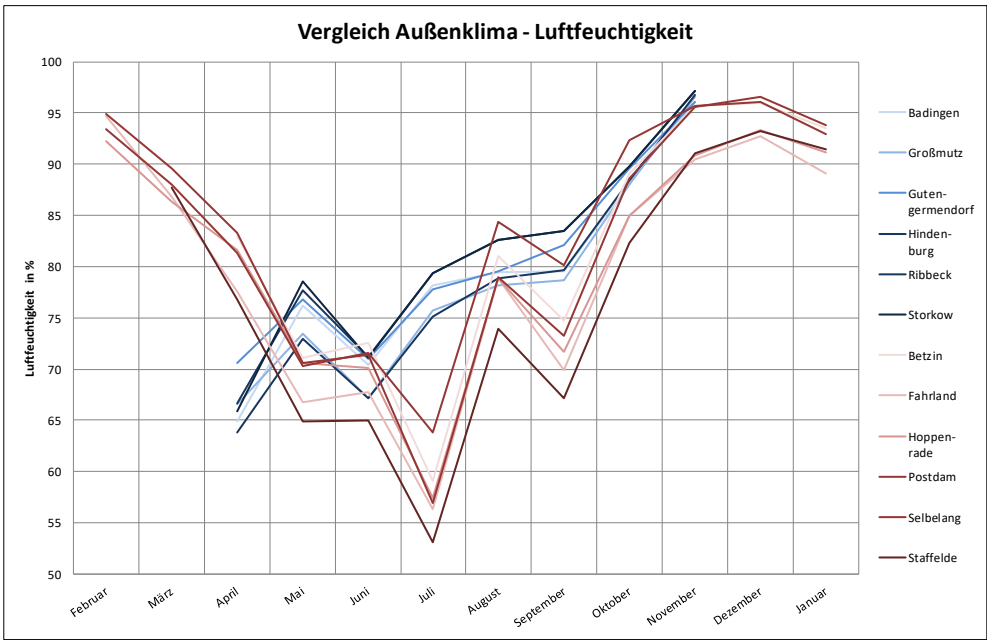


Abb. 7.5: Außenklima - relative Luftfeuchte

[117] Die jeweiligen Kirchen innerhalb eines Messzeitraums sind mit blauen (2005) bzw. roten (2006) Linien dargestellt

Eine Gegenüberstellung mit dem Klima im Inneren der Kirche zeigt, dass sich zwar die Raumlufttemperatur der Lufttemperatur im Außenbereich angleicht, ein Vergleich der relativen Luftfeuchten jedoch nicht vorgenommen werden kann, da sich diese zu unterschiedlich entwickelt haben.

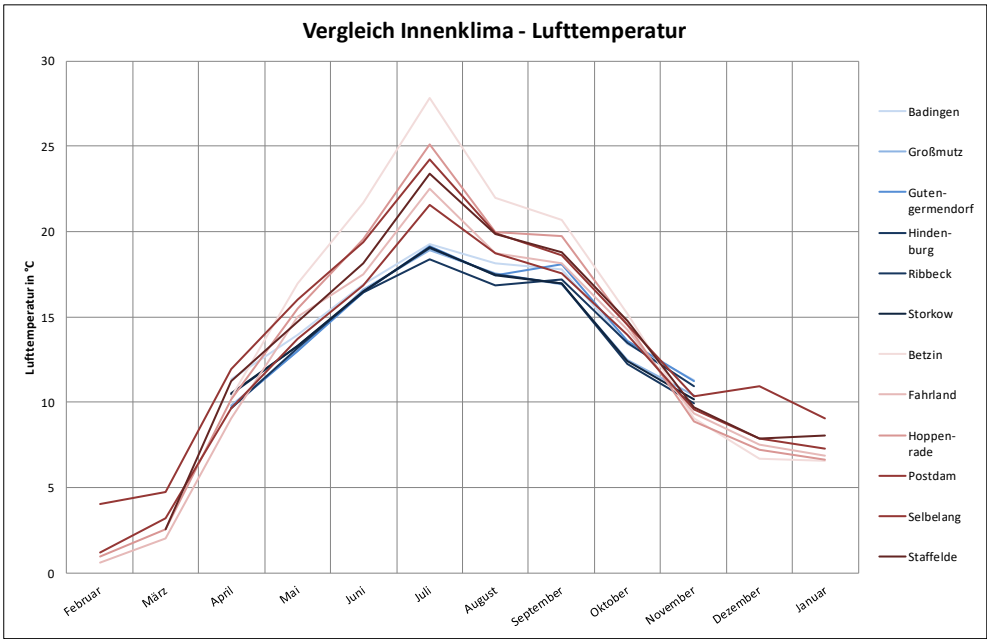


Abb. 7.6: Innenklima - Lufttemperatur

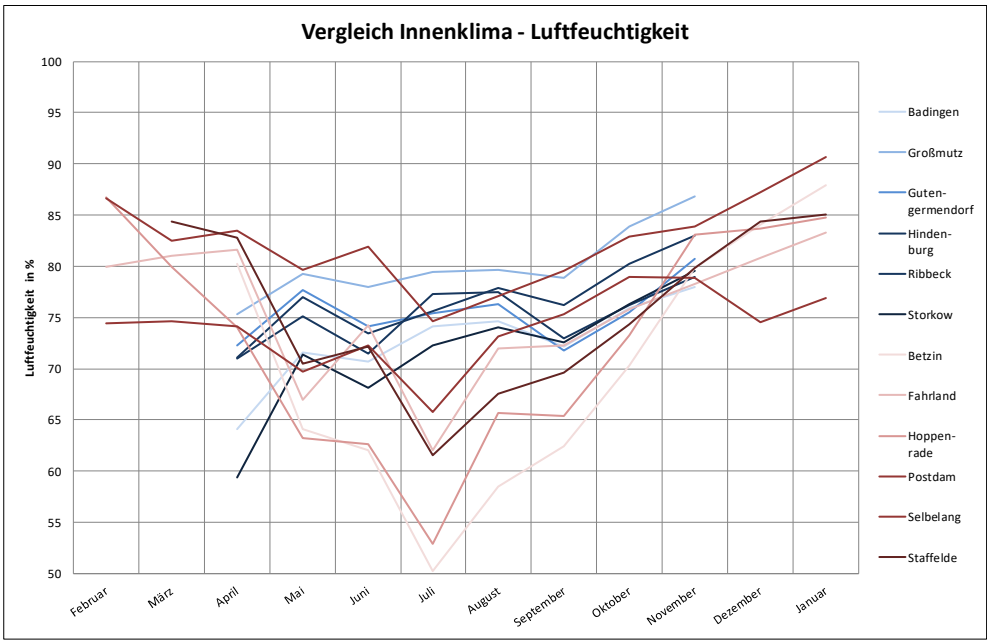


Abb. 7.7: Innenklima - relative Luftfeuchte

Zur Verdeutlichung der Differenzen zwischen dem Außenklima und dem Innenklima werden die Werte der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte tabellarisch gegenübergestellt. Es werden der minimale und maximale Abstand der Temperaturen außen und

innen, sowie entsprechend die Werte der relativen Luftfeuchte angegeben. Mit Aufnahme der Häufigkeit der Sommerkondensation in die Tabelle soll ein möglicher Zusammenhang deutlich gemacht werden.

Tabelle 15: Minimale und maximale Werte der Temperaturdifferenzen und der Differenzen relativen Luftfeuchte innen und außen[118]

Kirche	Temperatur in K		Relative Luftfeuchte in %		SK_{gesamt} in %
	Min.	Max.	Min.	Max.	
Staffelde	9,75	9,86	20,00	0,00	72,15
Hoppenrade	11,05	11,33	20,80	0,00	10,21
Selbelang	9,50	12,86	32,70	0,00	6,67
Großmutz	11,35	8,71	41,80	3,60	3,81
Hindenburg	11,36	7,65	28,70	3,80	2,40
Gutengermendorf	9,87	8,95	41,80	3,60	0,48
Fahrland	10,60	6,94	5,90	5,80	0,29
Ribbeck	9,60	12,80	28,70	3,80	0,27
Badingen	9,48	6,80	27,60	10,60	0,08
Storkow	11,09	10,20	31,60	10,60	0,07
Potsdam	11,39	5,72	27,30	12,30	0,01
Betzin	8,12	4,11	21,30	5,50	0,00

Hinsichtlich der maximalen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit, d.h. dem maximal gemessenen Wert außen (i.d.R. 100% rH) und dem maximal gemessenen Wert innen, ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dieser Differenz und dem Auftreten von Sommerkondensation. Je höher die Differenz, desto weniger Kondensation ist in dem jeweiligen Gebäude aufgetreten. Die Ausnahme bildet die Kirche in Betzin.
Bezüglich der Minimalwerte der relativen Luftfeuchte und der Temperaturen ist kein Zusammenhang herzustellen. Anhand der Grafiken Abb. 7.4 und Abb. 7.6 wird deutlich, dass eine Kausalität zwischen der Außentemperatur und der Innentemperatur besteht. Je wärmer das Außenklima ist, desto höhere Temperaturen sind bei der Raumluft zu verzeichnen. Das jahreszeitlich bedingte Klima hat demnach Einfluss auf die Erwärmung der Raumluft, die Erwärmung der Außenwand und die solaren Wärmegewinne innerhalb des Gebäudes. Das Klima nimmt demzufolge auch Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Die Zusammenhänge und Feststellungen wurden in Kapitel 7.3 dargestellt.

Einfluss des Klimas - Resümee

Die äußeren klimatischen Verhältnisse nehmen Einfluss auf das Raumklima und sind ein bestimmender Faktor für das Auftreten von Sommerkondensation.

[118] Bei der Berechnung der Minimalwerte ergeben sich aufgrund der Minustemperaturen im Außenbereich negative Werte. Diese sind der Tabelle mit ihrem Betrag angegeben. Die Werte von 0,0% bei der relativen Luftfeuchte liegen darin begründet, dass der Messsensor in den betroffenen Kirchen durch die hohe Luftfeuchtigkeit betaut wurde.

7.5 Einfluss der Lüftung, Beheizung und Temperierung

7.5.1 Einfluss der Lüftung

Wie einleitend bereits festgestellt, ist das Auftreten von Sommerkondensation in hohem Umfang von der Lüftung des Gebäudes abhängig. Einfluss nehmen hier die Lüftungsmöglichkeiten, der Lüftungszeitpunkt und die Lüftungsintervalle.

Die Lüftungsmöglichkeiten bei einer Kirche begrenzen sich zumeist auf das Öffnen von Fenstern und Türen (s. Tabelle 16). Auf Grund der häufig anzutreffenden Undichtigkeiten dieser Bauteile findet durch diese "natürliche" Lüftung zudem ein unkontrollierter Luftwechsel statt. In welchem Umfang sich dieser einstellt, könnte mit einer so genannten Blower-Door-Messung[119] festgestellt werden. Auf diese wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Allein aus dem Vorhandensein der Lüftungsmöglichkeiten kann kein Rückschluss auf die Häufigkeit der Sommerkondensation gezogen werden. Vielmehr sind der Lüftungszeitpunkt und die Lüftungsintervalle von Bedeutung.

Tabelle 16: Lüftungsmöglichkeiten - Auftreten von Sommerkondensation (SK)

Kirche	Lüftungsmöglichkeiten	SK_{gesamt} in %
Staffelde	Türen, Fenster (1 Flügel in 4-teiligem Fenster, 90x50 cm)	72,15
Hoppenrade	Tür (Eingangstür-Kirchenraum-Winterkirche)	10,21
Selbelang	Tür, Fenster (1x je Fenster, 25x50 cm)	6,67
Großmutz	Tür, Fenster (2x je Fenster, 40x60 cm)	3,81
Hindenburg	Tür, Fenster (Gazefenster von 23.05. bis 19.09.2005)	2,40
Gutengermendorf	Türen (Eingangstür-Kirchenraum, Tür Nordseite)	0,48
Fahrland	Fenster (2x je Fenster, 93x74 cm)	0,29
Ribbeck	Tür (Eingangstür-Kirchenraum-Winterkirche)	0,27
Badingen	Tür, Fenster (2 Fenster mit Kippflügel, 140x70 cm)	0,08
Storkow	Türen, Fenster (2 Fenster mit Kippflügel, 130x50 cm)	0,07
Potsdam	Tür (Eingangstür-Kirchenraum)	0,01
Betzin	Tür (Eingangstür-Kirchenraum-Winterkirche)	0,00

Bezüglich der Lüftungsintervalle wurde sehr unterschiedlich in den einzelnen Kirchen verfahren. In welchem Zeitraum die Gebäude gelüftet wurden, kann den Auswertungen in Band 2 entnommen werden.

Anhand der Kirche in Gutengermendorf soll verdeutlicht werden, welchen Einfluss der Lüftungszeitpunkt auf das Auftreten von Sommerkondensation hat. Diese Kirche wurde am ersten "warmen" Tag im Jahr 2005, am 01.05.2005 gelüftet. In den folgenden Grafiken werden der Verlauf des Raumklimas und der Verlauf der Oberflächentemperatur am Messpunkt Nord unten mit dem Vergleich der Taupunkttemperatur dargestellt.

[119] Verfahren zur Überprüfung der Luftdichtheit von Gebäuden

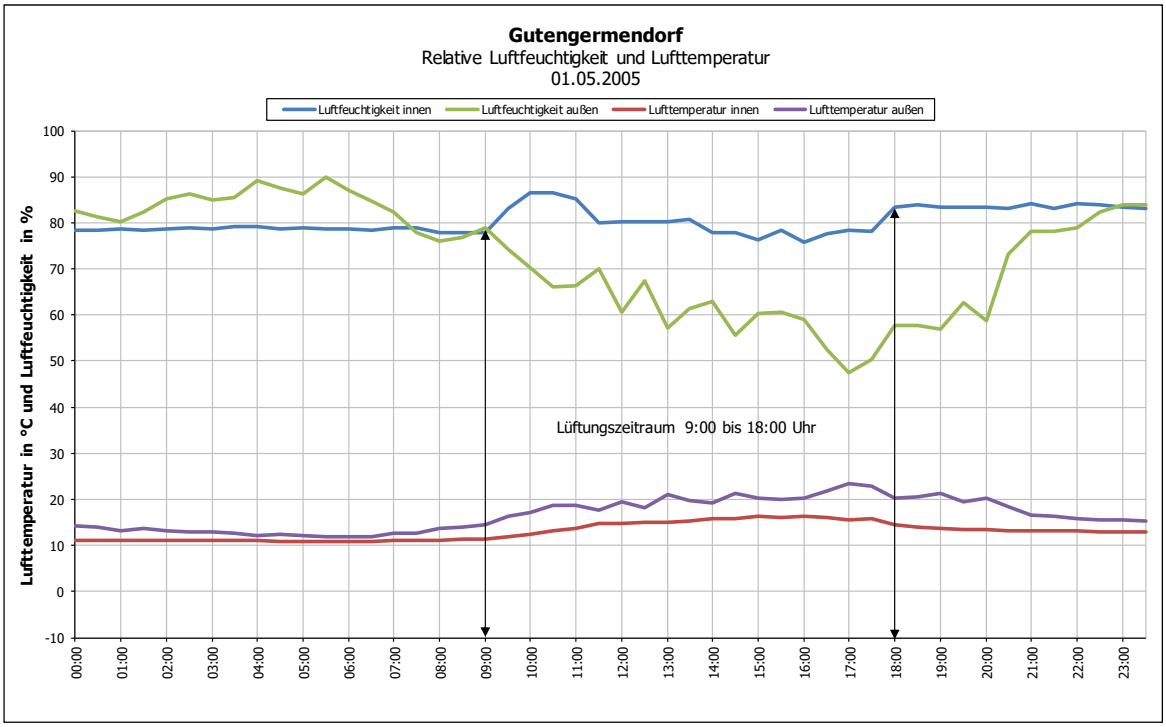


Abb. 7.8: Gutengermendorf - Lüften am 01.05.2005 - Klimavergleich

Am 01.05.2005 wurde die Kirche erstmalig in diesem Jahr durch das Öffnen zweier Türen in der Zeit von 9:00 Uhr bis 18:00 Uhr gelüftet. An diesem Tag wurde ein maximaler Wert der Lufttemperatur außen von 23°C (ca. 17:00 Uhr) gemessen. Die relative Luftfeuchte sank zu dieser Zeit auf einen Wert von 48% rH ab.

Deutlich wird, dass durch das Hereinlüften der wärmeren Luft aus dem Außenbereich die relative Luftfeuchte im Inneren zunächst um 8,7% - von 77,8% rH auf 86,5% rH - anstieg. Im weiteren Verlauf des Lüftungszeitraums senkte sich die Luftfeuchte auf 75,9% rH, um nach dem Schließen der Türen wieder auf Werte oberhalb von 83% rH anzusteigen.
Die Raumlufttemperatur stieg während des Lüftungszeitraums von 11,3°C auf 15,7°C an. Bei diesem Klimaparameter ist ebenfalls ein Absinken des Wertes nach Beendigung des Lüftens festzustellen. Die Temperatur im Inneren der Kirche sank auf 12,9°C ab.

Mit der obigen Grafik wird anschaulich, welche Auswirkungen das Hereinlüften warmer Luft hat: Die relative Luftfeuchte im Gebäude wird erhöht. Diese kurzfristigen Klimaschwankungen wirken sich möglicherweise schädlich auf die Bausubstanz und das Inventar aus. In nachfolgender Grafik wird die Auswirkung auf die Oberflächentemperatur am Messpunkt Nord unten (10 cm über OK Fußboden) anhand der Oberflächentemperatur und der Taupunkttemperatur veranschaulicht.

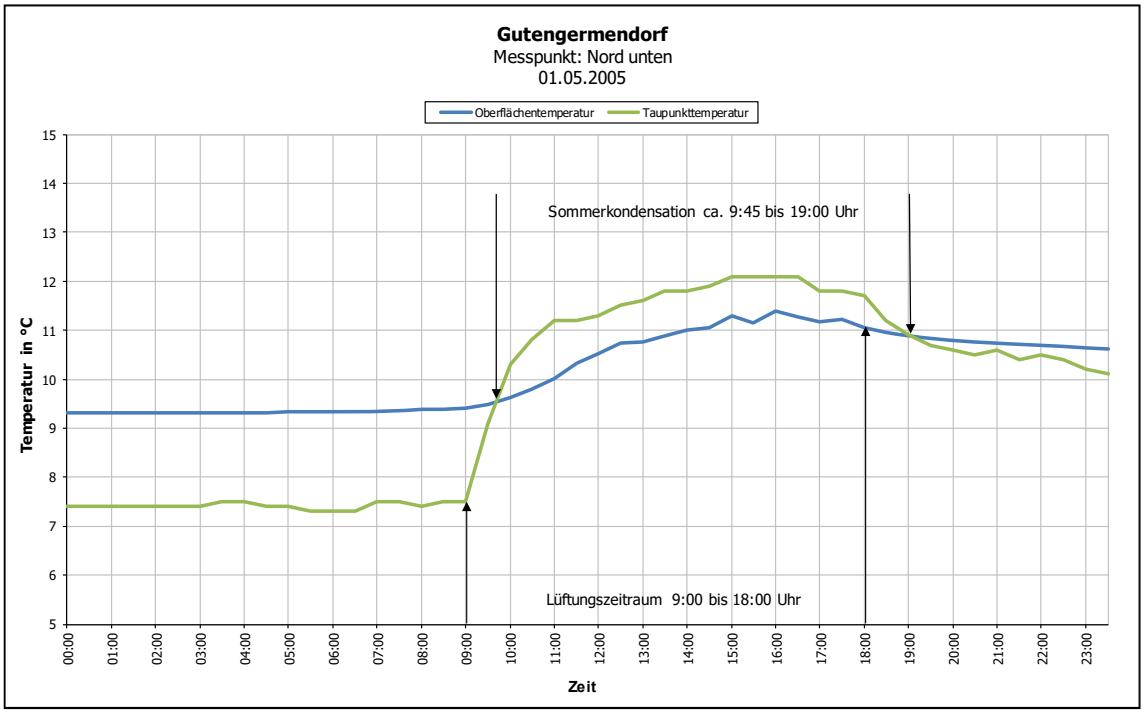


Abb. 7.9: Gutengermendorf - Lüften am 01.05.2005 - Messpunkt Nord unten

Mit einer Zeitverzögerung von ca. 45 Minuten konnte nach Beginn des Lüftens das Auftreten von Sommerkondensation festgestellt werden. Erst circa eine Stunde nach Beendigung des Lüftungsvorgangs sank die Taupunkttemperatur auf Werte ab, die eine Unterschreitung durch die Oberflächentemperatur nicht mehr zuließ. Die Gefahr von Sommerkondensation bestand ab ca. 19:00 Uhr nicht mehr. Jedoch ist am engen Abstand der Linien eine Annäherung der beiden Parameter deutlich - dies vor dem Hintergrund, dass vor Beginn des Lüftungszeitraums ein wesentlich größerer Abstand erkennbar ist.

Hinsichtlich der Oberflächentemperatur kann festgestellt werden, dass diese während des Lüftungszeitraums angestiegen ist. Eine hohe Oberflächentemperatur ist wichtig für die Schadensfreiheit eines Bauteils. Da dies jedoch nicht als alleiniges Kriterium zu sehen ist, muss diese Entwicklung stets in Verbindung mit der Taupunkttemperatur betrachtet werden.

Dem richtigen Lüftungszeitpunkt kommt eine hohe Bedeutung für das Auftreten von Sommerkondensation zu. Weitere Ausführungen hierzu werden in Kapitel 8.2 gemacht.

Feststellung

Das Auftreten von Sommerkondensation ist nicht von den Lüftungsmöglichkeiten abhängig, sondern in entscheidender Weise vom Lüftungszeitpunkt und den Klimabedingungen (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte).

7.5.2 Einfluss der Beheizung und Temperierung

Bei einer Temperierung wird die Temperatur im Gebäudeinneren bzw. die der einzelnen Bauteile (z.B. Wandheizung) auf eine mäßig warme Temperatur eingestellt, um Schäden an der Raumschale und dem Inventar zu vermeiden. Bei einer Beheizung werden mittels unterschiedlicher Heizsysteme (s. Kap. 8.1.1) höhere Raumtemperaturen als bei der Temperierung erreicht.

In den untersuchten Kirchen sind unterschiedliche Heizsysteme vorhanden (s. Tabelle 17). Lediglich in der Kirche in Potsdam ist zusätzlich zu den Bankheizungen eine "Wandheizung" vorhanden. Diese besteht aus einem Vor- und einem Rücklaufrohr, welche vor der Wand angebracht ist. Von einer Bauteiltemperierung kann hierbei nicht gesprochen werden, da die Vorlauftemperatur der Heizung während des Heizens sehr hoch (ca. 60°C) eingestellt war.

Aufgrund der geringen Nutzerzahlen während der Gottesdienste und deren zeitlichen Abständen (14- bis 21-tägig) werden die Kirchen nur zu den Gottesdiensten bzw. kurz davor beheizt. In einigen Kirchen sind sogenannte Winterkirchen vorhanden. Dies sind vom Kirchenraum abgetrennte kleine Räume, in denen sich meist Elektroheizungen befinden. Bei den Untersuchungen zur Sommerkondensation wurden diese Winterkirchen nicht betrachtet. In anderen Kirchen, wie beispielsweise in Fahrland, finden die Gottesdienste in den Wintermonaten im Gemeindehaus statt. Nur zu den kirchlichen Feiertagen, in der Weihnachtszeit, wird diese Kirche auch in der kälteren Jahreszeit genutzt.

Tabelle 17: Beheizungsmöglichkeiten - Auftreten von Sommerkondensation (SK)

Kirche	**Heizmöglichkeiten**	**SK_{gesamt} in %**
Staffelde	Bankheizung	72,15
Hoppenrade	Einzelofen	10,21
Selbelang	Bankheizung	6,67
Großmutz	nicht vorhanden	3,81
Hindenburg	nicht vorhanden	2,40
Gutengermendorf	Fußheizung	0,48
Fahrland	nicht vorhanden	0,29
Ribbeck	Einzelofen	0,27
Badingen	Bankheizung	0,08
Storkow	Bankheizung	0,07
Potsdam	Bank- und Wandheizung	0,01
Betzin	nicht vorhanden	0,00

Anhand der Kirche in Potsdam soll verdeutlicht werden, welchen Einfluss die Beheizung auf das Raumklima nimmt. Dem vorausgeschickt sei bemerkt, dass in dieser Kirche je ein Gottesdienst sonntags und montags stattfindet. Zu den sonntäglichen Veranstaltungen sind

durchschnittlich etwa 40 bis 50 Besucher anwesend, am Montagmorgen nehmen 240 Schüler aus der benachbarten Schule am Gottesdienst teil. Aufgrund dessen wird die Heizungsanlage der Kirche an diesen beiden Tagen kurz vor Beginn des Gottesdienstes in Betrieb genommen.

In dem betrachteten Zeitraum - dem 23.04. und 24.04.2006 - konnte zwar keine Sommerkondensation festgestellt werden, die Grafiken und Auswertungen sollen jedoch verdeutlichen, welchen Einfluss die Beheizung auf die Entwicklung der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte hat.

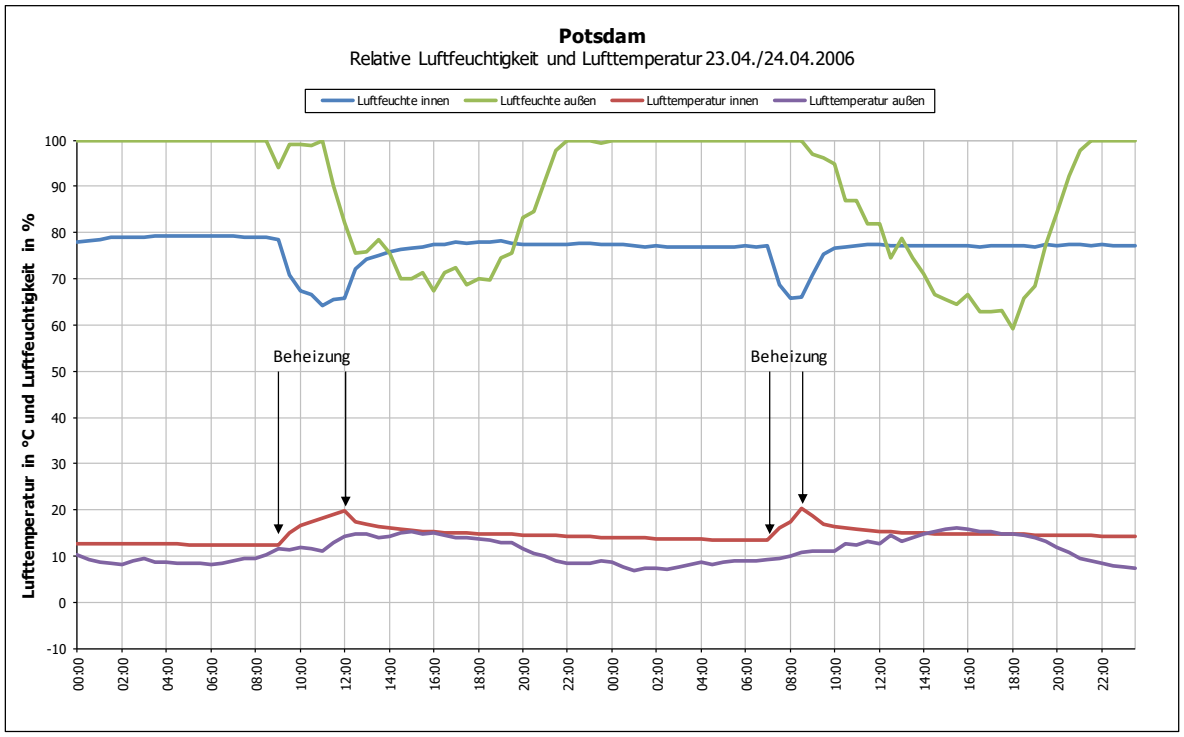


Abb. 7.10: Potsdam - Beheizung am 23.04. und 24.04.2006 - Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur

Während der Beheizungsphasen ist die Raumlufttemperatur am 23.04.2006 von 12,5 °C auf 19,9 °C und am 24.04.2006 von 13,4 °C auf 20,3 °C gestiegen. Dies entspricht einer Erhöhung der Lufttemperatur im Inneren der Kirche um 7,4 bzw. 6,9 °C.
Die relative Luftfeuchte sank am 23.04.2006 von 79% rH auf 64,2% rH und am 24.04.2006 von 77% rH auf 65,8% rH. Dies bedeutet, dass Differenzen von 14,8% bzw. 11,2% aufgetreten sind.

Bei solch hohen Schwankungen ist davon auszugehen, dass auch ohne das Auftreten von Sommerkondensation Schäden an den Baustoffen und den Holzbauteilen, insbesondere der Orgel, wahrscheinlich sind. Dies vor allem vor dem Hintergrund, dass diese Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsdifferenzen innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums von zwei bis drei Stunden auftreten.

Wie sich die temporäre Beheizung auf die Oberflächentemperatur an den Messpunkten auswirkt, wird in nachstehender Grafik dargestellt.

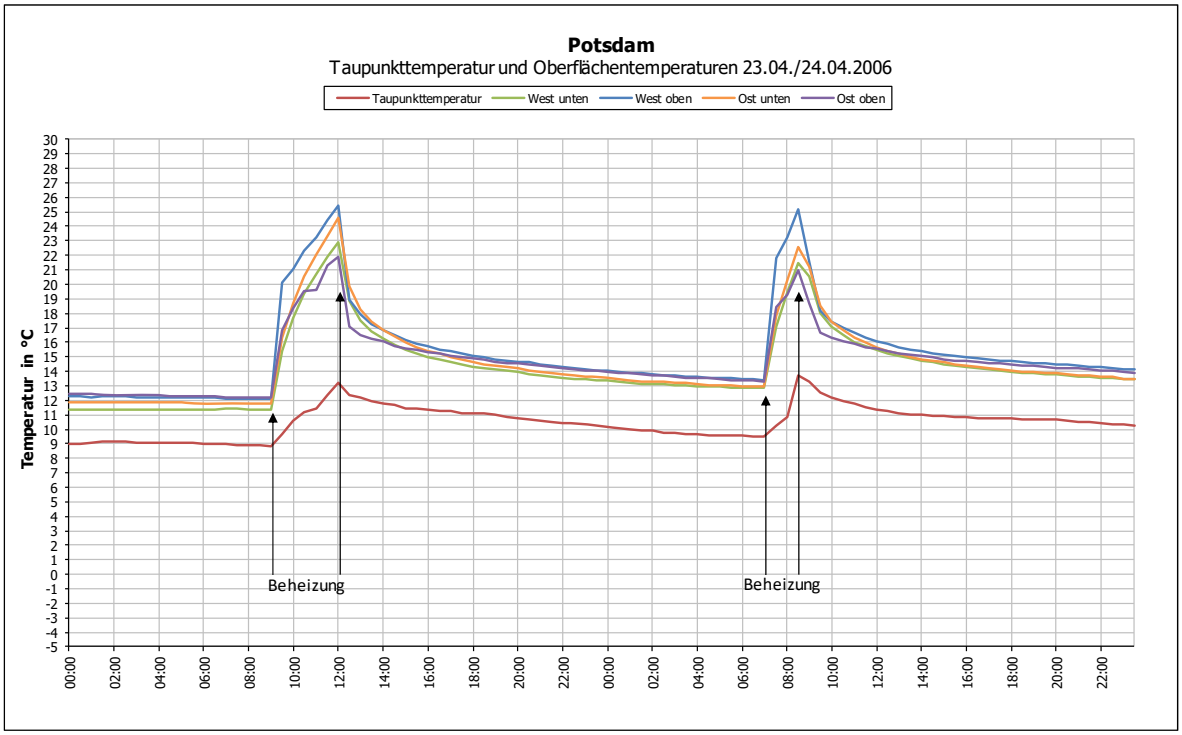


Abb. 7.11: Potsdam - Beheizung am 23.04. und 24.04.2006 - Taupunkttemperatur und Oberflächentemperaturen

Wie aus Abb. 7.11 ersichtlich, sind die Oberflächentemperaturen während der Beheizungsperiode stark angestiegen. Dies ist durch die, vor der Wand angebrachten, Heizungsrohre begründet. So ist beispielsweise am Messpunkt West oben (blaue Linie) die Oberflächentemperatur von 12,8 °C auf 22,9 °C angestiegen. Nach dem Abschalten des Heizsystems ist die Temperatur an diesem Messpunkt innerhalb von 19 Stunden auf einen Wert von 13,3 °C gesunken. Auch in diesem Fall gilt, dass sich die hohen Temperaturschwankungen an der Baustoffoberfläche negativ auf das Baustoffgefüge auswirken können.

Feststellung
Die Oberflächentemperatur der Bauteile hängt von der Beheizung ab.

Zur Verdeutlichung, welchen Einfluss die Beheizung auf das Auftreten von Sommerkondensation nimmt, wird am Beispiel der Kirche in Staffelde aufgezeigt: Es wird dargestellt, wie sich die Raumklimawerte, die Taupunkttemperatur und die Oberflächentemperatur durch Inbetriebnahme der dort eingebauten Bankheizung ändern.

Am 07.01.2007 fand zwischen 9:00 und 10:00 Uhr ein Gottesdienst statt, an dem acht Personen teilnahmen. Die Bankheizung war von 8:30 bis 10:15 Uhr in Betrieb. In diesem Zeitraum stieg die Raumlufttemperatur von 8,8 °C auf 15,3 °C an. Die relative Luftfeuchte sank von 86% rH auf 70,2% rH ab.
Die Oberflächentemperaturen an den Messpunkten stiegen ebenfalls an. Bereits vor Beginn der Beheizung konnte Kondensation am Messpunkt Nord unten festgestellt werden. Mit dem Einschalten der Bankheizung fand jedoch eine Taupunktunterschreitung am Messpunkt Nord oben statt - es kam es auch hier zum Auftreten von Sommerkondensation. An den Messpunkten auf der Südseite konnte keine Kondensation festgestellt werden. Nach Beendigung der Beheizung sanken alle Oberflächentemperaturen stark ab und näherten sich dem Verlauf der Taupunktlinie an. Die Gefahr von weiterer Sommerkondensation ist damit gegeben. Die gemachten Ausführungen werden in den nachfolgenden Grafiken verdeutlicht.

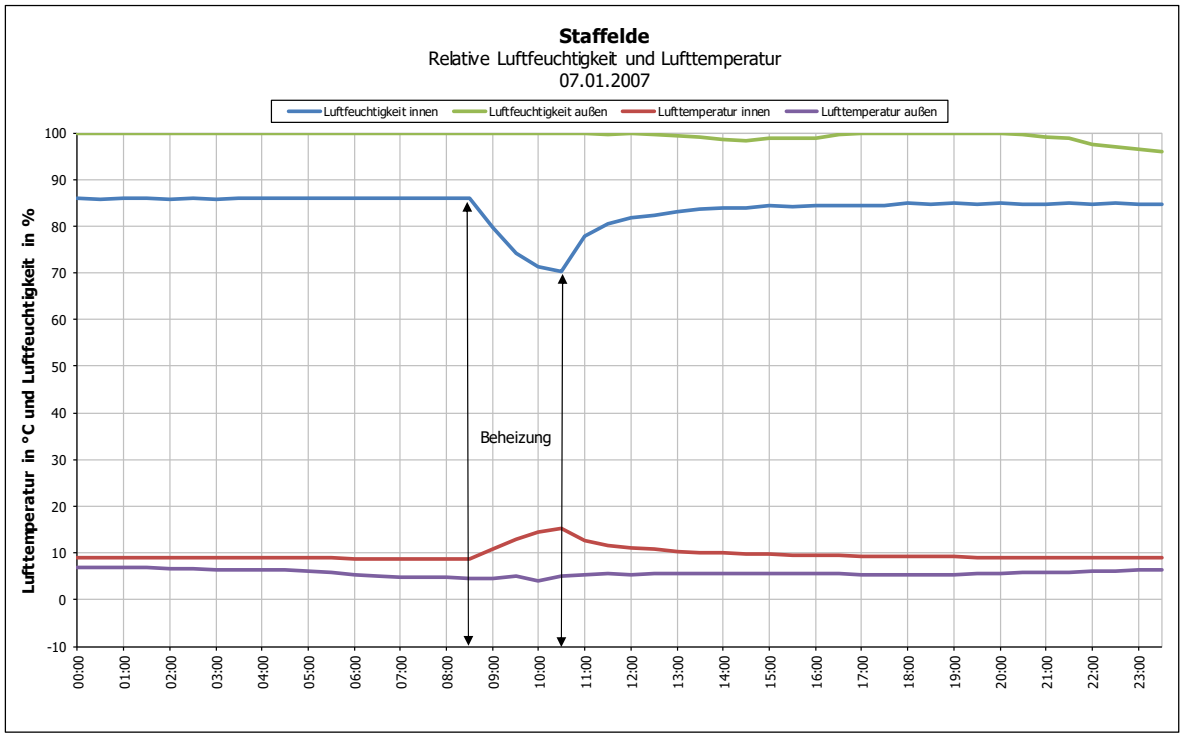


Abb. 7.12: Staffelde - Beheizung am 07.01.2007 - Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur

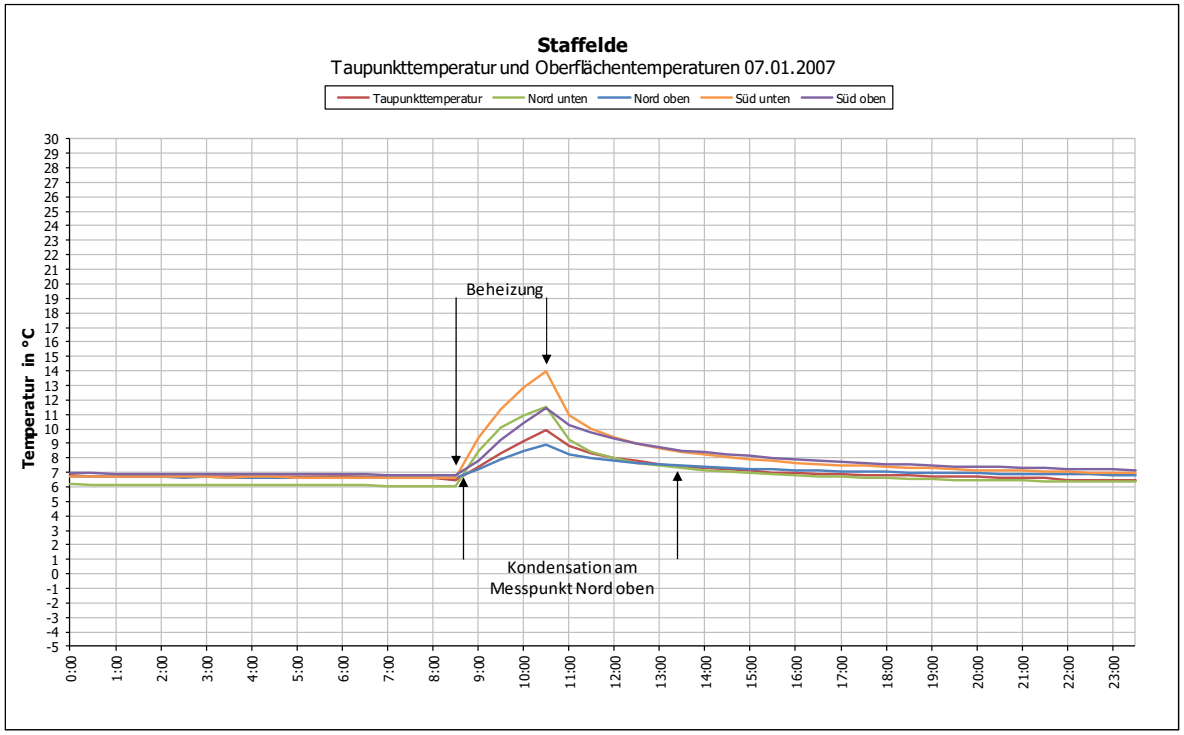


Abb. 7.13: Staffelde - Beheizung am 07.01.2007 - Taupunkttemperatur und Oberflächentemperaturen

Durch die Veränderung der Raumklimaparameter relative Luftfeuchte und Raumlufttemperatur ändert sich die Taupunkttemperatur. Durch die Veränderung der Oberflächentemperatur kann es zum Auftreten von Sommerkondensation kommen.

Feststellung
Ob Sommerkondensation auftritt, ist von der Beheizung abhängig.

Einfluss der Lüftung, Beheizung und Temperierung - Resümee
Dem richtigen Lüftungszeitpunkt sowie der Beheizung und Temperierung kommt eine hohe Bedeutung für das Auftreten von Sommerkondensation zu. Diese Maßnahmen müssen auf die Raumklimaparameter und das Außenklima abgestimmt werden.

7.6 Einfluss der Nutzung

Die untersuchten Kirchen sind kleine Dorfkirchen im Land Brandenburg. Aufgrund der geringen Anzahl an Kirchenbesuchern und der Zusammenlegung der Pfarrgemeinden, finden Gottesdienste (GD) in diesen Kirchen lediglich im zwei- bis dreiwöchigem Rhythmus statt. Die Ausnahme bilden die Kirche in Fahrland mit einem wöchentlichen Gottesdienst im Sommer und die Kirche in Potsdam mit zwei Gottesdiensten pro Woche. Die Nutzerzahlen wur-

den von den Kirchenverantwortlichen aufgezeichnet und sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Die maximalen Werte werden an kirchlichen Feiertage erreicht - in Potsdam jedoch an Montagen beim Schulgottesdienst.

Tabelle 18: Nutzung - Auftreten von Sommerkondensation (SK)

Kirche	Nutzung	Nutzeranzahl	SK_{gesamt} in %
Staffelde	GD, 14-tägig	8-60	72,15
Hoppenrade	GD, 14-tägig	3-70	10,21
Selbelang	GD, 21-tägig	3-70	6,67
Großmutz	GD, 14 bis 21-tägig	6-60	3,81
Hindenburg	GD, 21-tägig	5-13	2,40
Gutengermendorf	GD, 14 bis 21-tägig	13-25	0,48
Fahrland	GD, wöchentlich (nur Sommer)	10-200	0,29
Ribbeck	GD, 14-tägig	10-15	0,27
Badingen	GD, 14-tägig	10-15	0,08
Storkow	GD, 21-tägig	4-53	0,07
Potsdam	GD, wöchentlich	25-250	0,01
Betzin	GD, 14 bis 21-tägig	7-28	0,00

Es wird nachfolgend aufgezeigt, welchen Einfluss die Anzahl der Nutzer auf das Raumklima und das Auftreten von Kondensation hat. Zur Betrachtung dieser Entwicklung wird die Kirche in Fahrland herangezogen. Hier fanden am 24.12.2006 zwei Gottesdienste statt. Zwischen 16:00 und 18:00 Uhr waren 140 Personen anwesend und zwischen 20:30 und 22:15 Uhr 100 Besucher. Wie bereits im vorigen Kapitel beschrieben, kann diese Kirche nicht beheizt werden. Die Raumlufttemperatur lag vor den Gottesdiensten bei einem gleichmäßigen Wert von ca. 6,5°C und stieg während der Nutzung der Kirche auf 17,9 bzw. 16,3 °C an. Die relative Luftfeuchte sank während der Veranstaltungen von 82% rH auf 63,4% rH bzw. 62,6% rH ab.

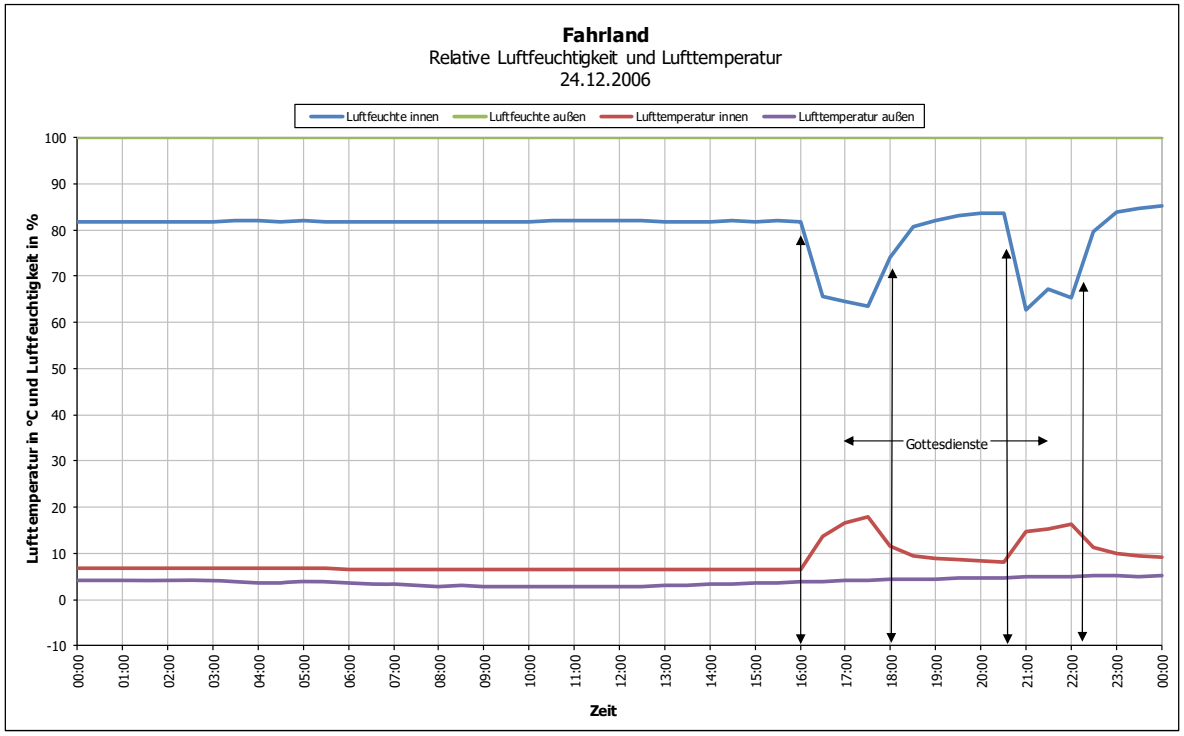


Abb. 7.14: Fahrland - Gottesdienste am 24.12.2006 - Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur

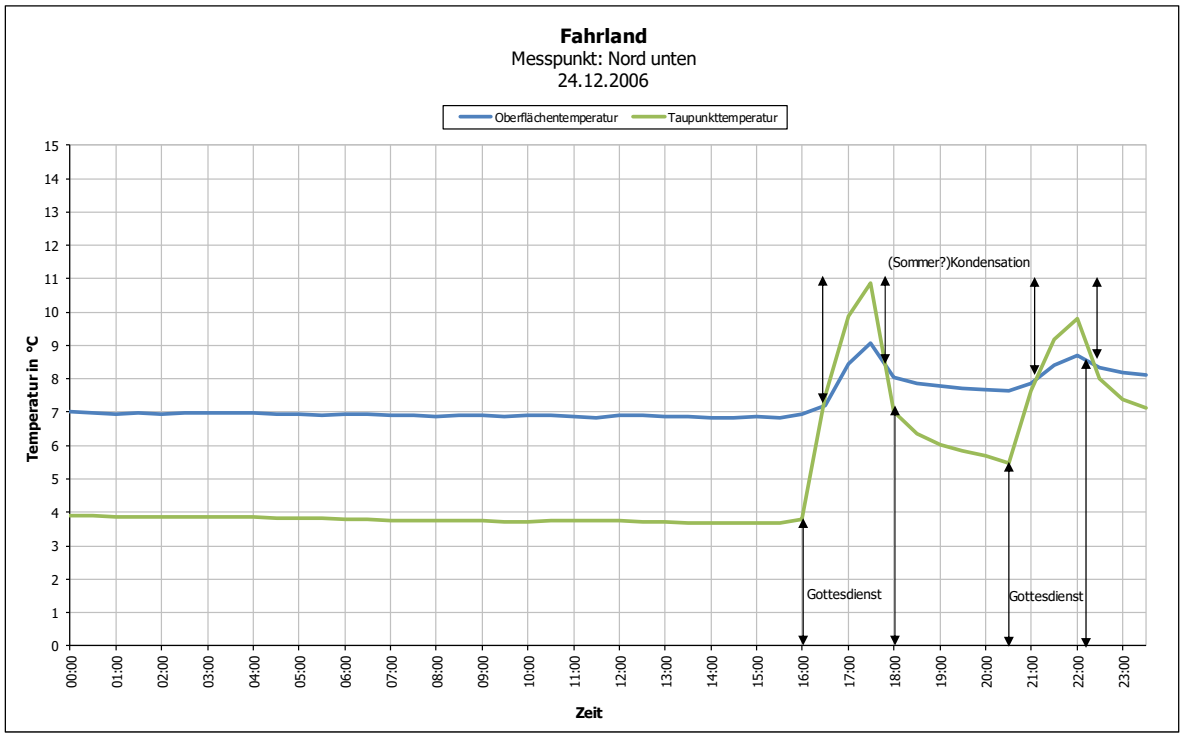


Abb. 7.15: Fahrland - Gottesdienste am 24.12.2006 - Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur (Messpunkt Nord unten)

Es kann anhand des Messpunktes "Nord unten" festgestellt werden, dass die Taupunkttemperatur und die Oberflächentemperatur während der Gottesdienste angestiegen sind.

Die Unterschreitung der Taupunkttemperatur durch die Oberflächentemperatur impliziert das Auftreten von Kondensation - Sommerkondensation am 24. Dezember!?

Der physikalische Hintergrund kann mit der Erwärmung der Raumluft durch die Nutzer und der damit verbundenen Absenkung der relativen Luftfeuchte erklärt werden. Mit diesen beiden Werten wird die Taupunkttemperatur berechnet. Ebenso sorgen die Besucher für eine Erwärmung der oberflächennahen Bauteilschichten und somit zu einer Unterschreitung des Taupunkts. ROLOFF geht davon aus, dass "in durch Sommerkondensat gefährdeten Gebäuden der Besucherverkehr die Tauwasserbildung deutlich verstärken kann. Die Ursache ist neben der Feuchteabgabe der Besucher vor allem die Erhöhung des Luftwechsels infolge des häufigen Öffnens der Außentüren[120]."

Einfluss der Nutzung - Resümee

Das Auftreten von Sommerkondensation hängt von der Nutzung, explizit den Nutzerzahlen, ab. Bei hohen Nutzerzahlen kann Sommerkondensation auftreten.

7.7 Einfluss der Salze

In Ergänzung der zu überprüfenden Faktoren (s. Abb. 5.1) wird in diesem Kapitel geprüft, ob das Vorhandensein von bauschädlichen Salzen Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation hat. Mit Verweis auf Kapitel 6.4 und den Bewertungen nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D[121] stellen sich die Ergebnisse der Salzanalysen der Baustoffproben aus den Kirchen folgendermaßen dar:

Tabelle 19: Salze - Auftreten von Sommerkondensation (SK)

Kirche	Chlorid	Nitrat	Sulfat	SK_{gesamt} in %
Staffelde	gering	hoch	gering	72,15
Hoppenrade	gering	mittel	mittel	10,21
Selbelang	gering	hoch	hoch	6,67
Großmutz	gering	hoch	mittel	3,81
Hindenburg	gering	hoch	mittel	2,40
Gutengermendorf	gering	hoch	mittel	0,48
Fahrland	gering	hoch	hoch	0,29
Ribbeck	gering	mittel	hoch	0,27
Badingen	gering	gering	hoch	0,08
Storkow	gering	hoch	mittel	0,07
Potsdam	gering	hoch	hoch	0,01
Betzin	gering	hoch	mittel	0,00

[120] Roloff u.a. 2009, S. 19.
[121] WTA 4-5-99:2015-10, S. 16.

Es sei angemerkt, dass die entnommenen Baustoffproben keine Aussage über den tatsächlichen Gehalt an bauschädlichen Salzen in der gesamten Kirche zulassen, da bei der Entnahme der Proben auf ein subtanzschonendes Verfahren zurückgegriffen worden ist.
Ein hoher Gehalt an bauschädlichen Salzen kann durch die hygroskopische Wirkung mehr Feuchtigkeit innerhalb des Baustoffgefüges speichern, da die Salze diese Feuchtigkeit aus einer hohen Raumluftfeuchtigkeit "ziehen" können. Wie jedoch aus Tabelle 19 ersichtlich, lässt der Salzgehalt der Baustoffe keinen Rückschluss auf die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sommerkondensation zu.

Einfluss der Salze - Resümee
Das Auftreten von Sommerkondensation hängt nicht von dem Vorhandensein bauschädlicher Salze ab.

7.8 Auftreten von jahreszeitlich bedingter Sommerkondensation

Das Phänomen der Sommerkondensation tritt auch auf, wenn ein Gebäude in hohem Umfang genutzt wird (s. Kap. 7.6). Dies stellt jedoch einen Ausnahmefall dar. Die kirchlichen Feiertage, zu denen kleine Dorfkirchen durch eine große Zahl an Personen genutzt wird, sind begrenzt. Diesen Sachverhalt außer Acht lassend, soll nun die weitere Frage beantwortet werden, ob zu bestimmten Zeitabschnitten eines Jahres bzw. definierbaren klimatischen Bedingungen Sommerkondensation auftritt und ob diese unter Beachtung dieser Verhältnisse reduziert werden können.

Ausgehend von den Vergleichsmöglichkeiten der Kirchen untereinander werden exemplarisch die Kirchen in Selbelang und Staffelde betrachtet. Diese beiden Gebäude wurden messtechnisch im gleichen Zeitraum erfasst und weisen weitere Vergleichsmöglichkeiten bezüglich der Ausrichtung, der Kubatur, des Materials der Außenwand, der Wanddicke sowie der Lüftungs- und Beheizungsmöglichkeiten auf (s. Tab. 5).

In Staffelde ist mit einer Häufigkeit von 72,15% und in Selbelang zu 6,67% Sommerkondensation aufgetreten.

Die beiden folgenden Grafiken geben Aufschluss darüber, in welchen Monaten es zu Kondensationserscheinungen gekommen ist.

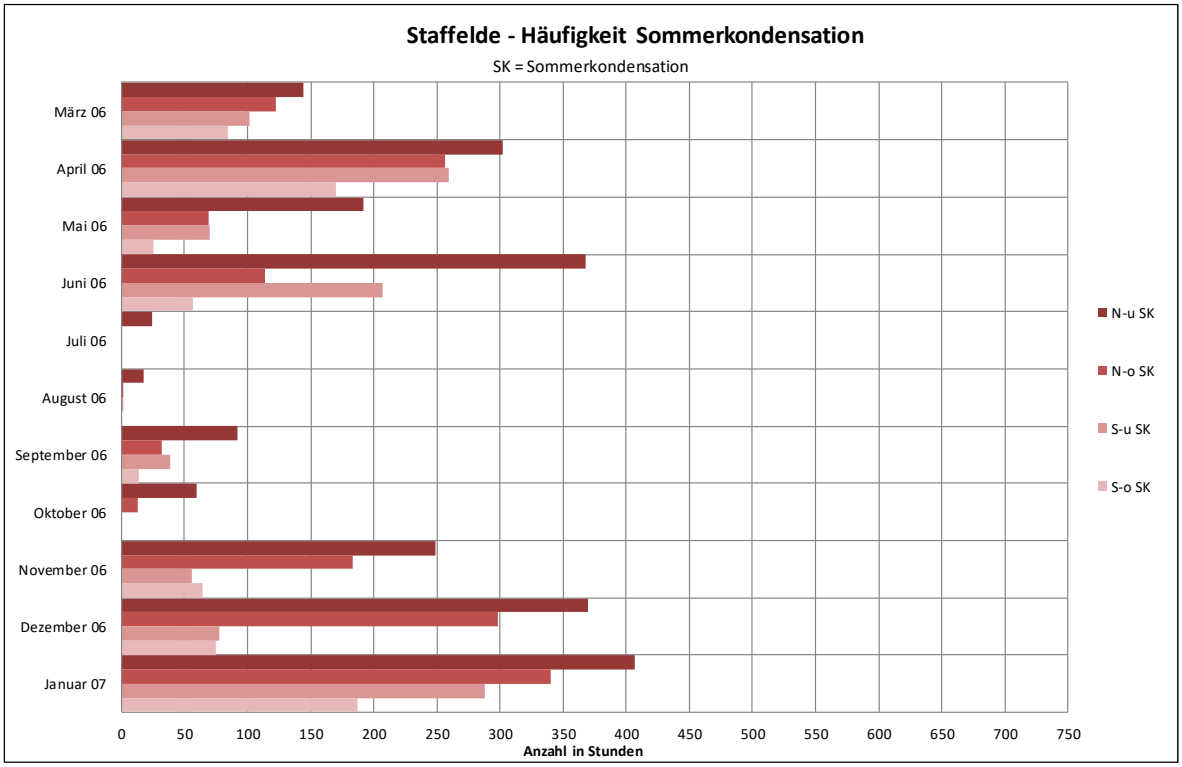


Abb. 7.16: Staffelde - Häufigkeit Sommerkondensation

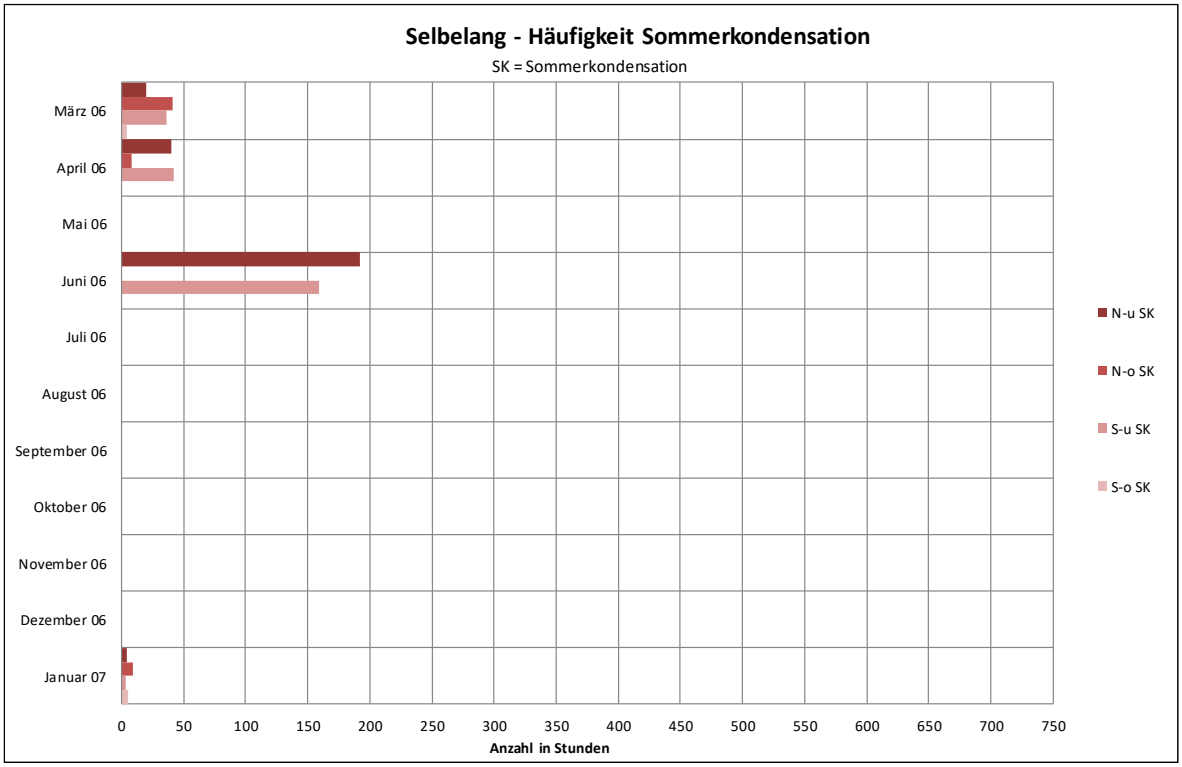


Abb. 7.17: Selbelang - Häufigkeit Sommerkondensation

Ausgehend von der meteorologischen Jahreszeit des "Sommers", die die Monate Juni, Juli, und August umfasst, findet der Vorgang der Sommerkondensation lediglich im Juni statt. Dies trifft auch auf die weiteren untersuchten Kirchen zu (s. Band 2). Das Phänomen der Sommerkondensation ist jedoch vielmehr in den "kälteren" Jahreszeiten anzutreffen.
Es stellt sich die Frage, ob die Klimabedingungen innerhalb eines Gebäudes ausschlaggebend für die Häufigkeit von Kondensationsvorgängen sind. Wie beschrieben (s. Kap. 7.4), sind die klimatischen Verhältnisse im Außenbereich während des Messzeitraums vergleichbar. Abweichend verhält sich dies mit den Klimabedingungen im Inneren der Kirchen. Während die Raumlufttemperauren einem ähnlichen Verlauf folgen, ist dies bei den relativen Luftfeuchten nicht der Fall. Ausgehend von den Mittelwerten dieser Parameter wird in den folgenden Grafiken darstellt, wie sich diese innerhalb des Messzeitraums darstellen.

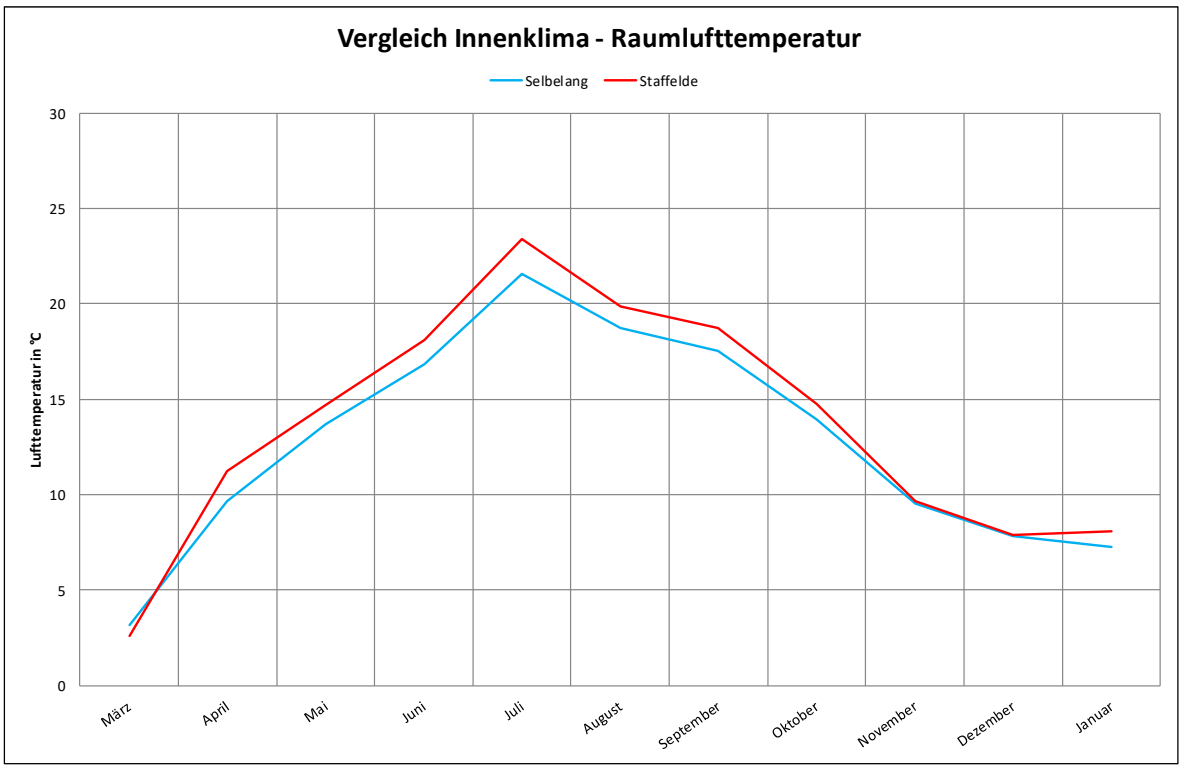


Abb. 7.18: Vergleich Innenklima - Raumlufttemperatur

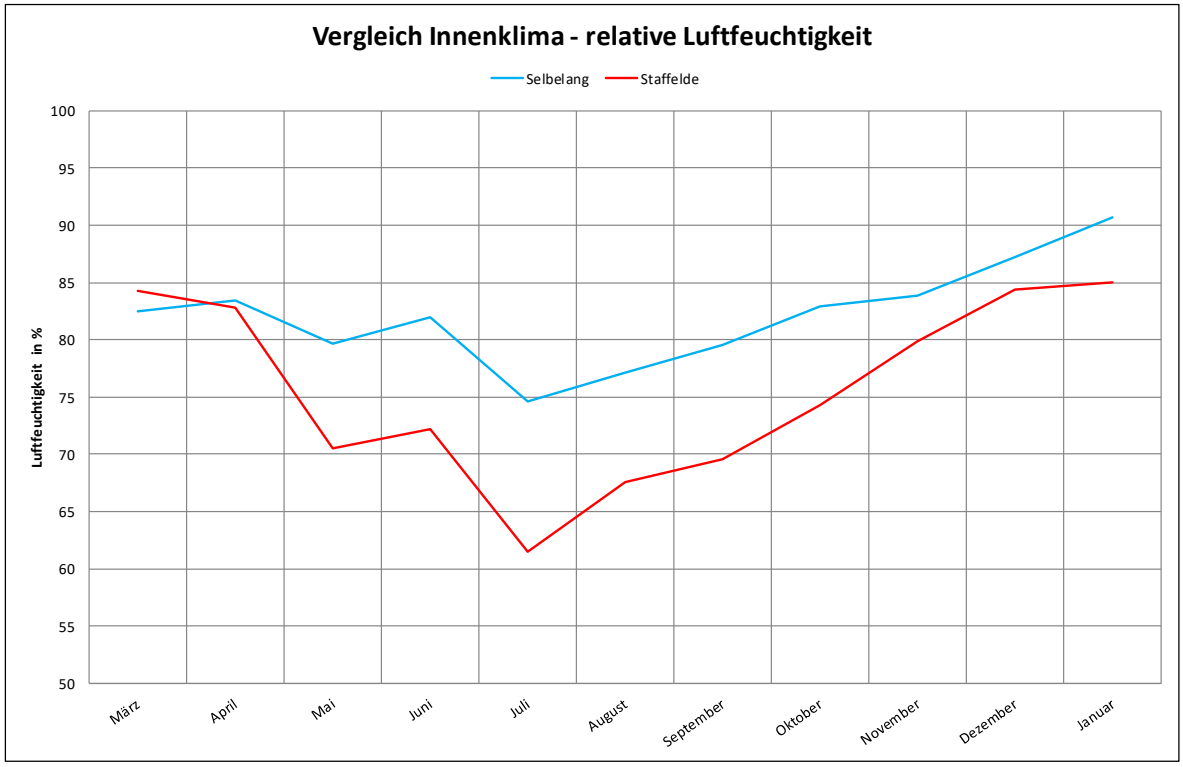


Abb. 7.19: Vergleich Innenklima - relative Luftfeuchtigkeit

Aus den Werten der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte lässt sich die Taupunkttemperatur ermitteln. Liegt die Oberflächentemperatur der Bauteile unterhalb der Taupunkttemperatur tritt Sommerkondensation auf. Die Oberflächentemperatur sollte demnach möglichst hoch, die Taupunkttemperatur möglichst niedrig sein.

Ausgehend von den Ausführungen zur Taupunkttemperatur (s. Kap. 2.5) und deren Werten in Tabelle 2 ergeben sich bei beispielhaft folgende Werte:

Lufttemperatur 10°C, 50% relative Luftfeuchte ⇨ Taupunkttemperatur 0,1°C
Lufttemperatur 10°C, 80% relative Luftfeuchte ⇨ Taupunkttemperatur 6,7°C
Lufttemperatur 20°C, 50% relative Luftfeuchte ⇨ Taupunkttemperatur 9,3°C
Lufttemperatur 20°C, 80% relative Luftfeuchte ⇨ Taupunkttemperatur 16,4°C

Je höher die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur, desto höher ist die Taupunkttemperatur.

Obwohl die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur in der Kirche in Staffelde im Jahresverlauf niedriger ist als in der Kirche Selbelang, ist dort häufiger Sommerkondensation aufgetreten.

Feststellung
Allein aus der Kenntnis der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte lässt sich noch keine Aussage zum Auftreten von Sommerkondensation treffen.

Diese Feststellung und das "Prüfschema" in Abbildung 5.1 implizieren, dass zur abschließenden Beurteilung die Betrachtung der Oberflächentemperatur erfolgen muss.

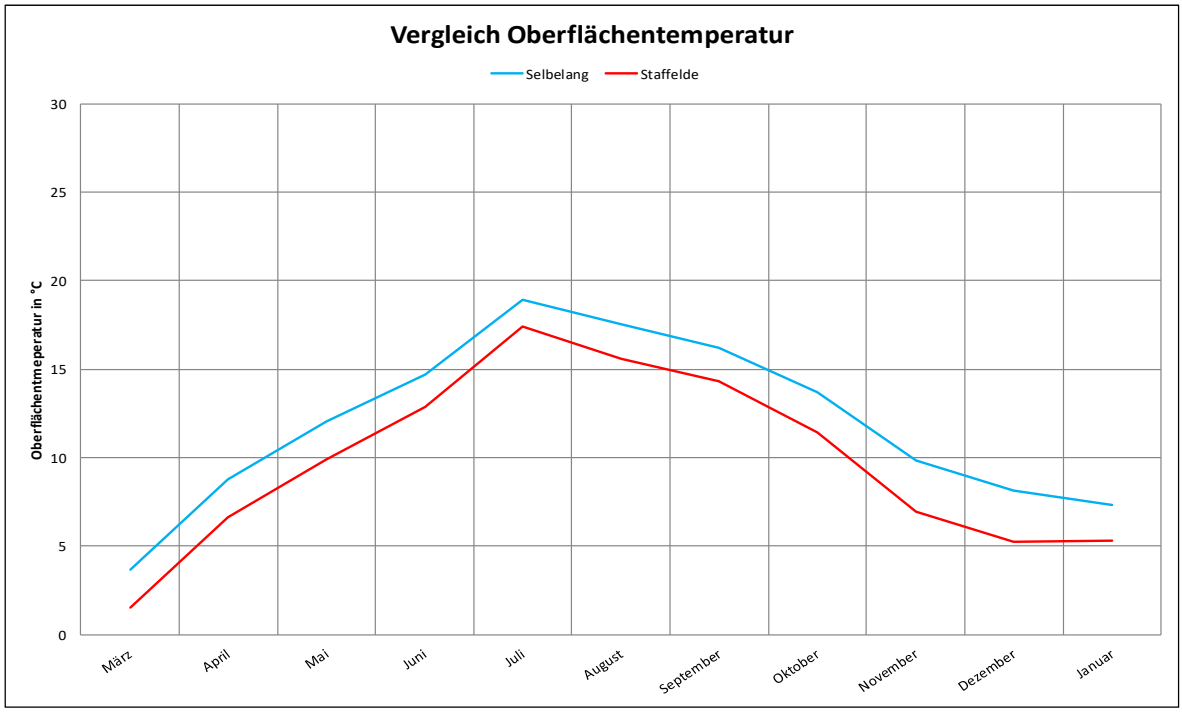


Abb. 7.20: Vergleich Oberflächentemperatur

Aus dieser Abbildung kann abgelesen werden, dass die Oberflächentemperatur der Kirche zu Staffelde im Monatsmittel niedriger liegt als die der Selbelanger Kirche. Dies bedeutet, dass die höhere Raumlufttemperatur sich nicht zwingend in positiver Weise auf die Erwärmung der Bauteiloberflächen auswirken müssen. Vielmehr ist die höhere Luftfeuchtigkeit dafür verantwortlich, dass die oberflächennahen Bauteilschichten einen höheren Feuchtegehalt aufweisen und durch die entstehende Verdunstungskälte für eine niedrige Oberflächentemperatur sorgt.

Feststellung
Die Oberflächentemperatur ist abhängig von der relativen Luftfeuchte.

Einfluss der Raumklimaparameter

Die Häufigkeit des Auftretens von Sommerkondensation ist von der relativen Luftfeuchtigkeit im Inneren des Gebäudes abhängig. Jedoch sind die Erwärmung der Oberfläche und damit die Erhöhung der Oberflächentemperatur durch die Raumluft von Bedeutung.

7.9 Zusammenfassung

Anhand der bisherigen Feststellungen kann nun beantwortet werden, welche Kirchen in besonderem Maß der Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation ausgesetzt sind.

Diesem vorangestellt verdeutlicht Tabelle 20 die Einflussfaktoren in einer zusammenfassenden Darstellung. Die Ergebnisse basieren auf den in den vorherigen Kapiteln getroffenen Feststellungen.

Tabelle 20: Übersicht der Einflussfaktoren und deren Bedeutung für die Sommerkondensation

Einflussfaktor	Bedeutung für die Sommerkondensation
Klima	+
Lage	+-
• Ausrichtung	+
• Topografie	+-
Bauzeit	-
Bauliche Eigenschaften	+-
• Dicke der Außenwand	-
• Baumaterial	+-
• Fensterflächen	+
• Raumvolumen	+
Lüftung	+
Beheizung bzw. Temperierung	+
Nutzung	+
- nein **+** ja	**+-** nicht eindeutig

Es lässt sich festhalten, dass die Kenntnis einiger Einflussfaktoren einen Rückschluss auf die Gefährdung eines Gebäudes hinsichtlich des Auftretens von Sommerkondensation zulassen. Diese Einflussfaktoren lassen sich sowohl durch bloße Inaugenscheinnahme (Lage), durch ein Aufmaß (Fensterflächen, Raumvolumen) oder durch Aufzeichnungen der Verantwortlichen (Lüftung, Beheizung, Nutzung) feststellen. Bauphysikalische Messungen sind hierfür nicht zwingend notwendig.

Zusammengefasst bedeutet dies:

Klima

- Das Außenklima (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) hat entscheidenden Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation. Aufgrund der Infiltration durch "undichte" Fenster findet ein Luftaustausch zwischen Innen und Außen statt. Da das Außenklima jährlich sehr unterschiedlich ist, kann jedoch keine generalisierende Aussage zum Zusammenhang zwischen Klima und der Sommerkondensation getroffen werden.

Lage

- Können die Außenwände eines Gebäudes aufgrund ihrer Ausrichtung ausreichend durch die Sonne bestrahlt werden, so erwärmen sich diese schneller. Die Oberflächentemperatur der Bauteilinnenfläche erhöht sich und der Taupunktabstand wird vergrößert. Ebenso wird die Raumlufttemperatur erhöht und die Gefahr von Sommerkondensation somit gesenkt. Optimal ist eine Ausrichtung einer Längswand nach Süden. Der Faktor "Lage" ist statisch: Dies bedeutet, dass er nicht geändert werden kann.
- Wird das Gebäude durch seinen umgebenden Bewuchs in hohem Maße verschattet, so steigt die Gefahr von Sommerkondensation, da solare Wärmegewinne hierdurch nicht verzeichnet werden können. Durch das Entfernen bzw. Beschneiden des Bewuchses kann hier Einfluss auf das Maß der Kondensation genommen werden.

Bauzeit

- Keinen Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation hat die Bauzeit der Kirche. Eine Aussage in der Form "Je älter die Kirche, desto eher wird Sommerkondensation auftreten" oder umgekehrt, lässt sich daraus nicht ableiten.

Bauliche Eigenschaften

- Die Dicke der Außenmauer hat keinen unmittelbaren Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation. Weitere Forschungsarbeit hierzu ist notwendig, um den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der Außenwände zu prüfen. Dies ist jedoch nur mit zerstörenden Maßnahmen und hohem Aufwand möglich. Die Ergebnisse, die zu den Feststellungen im Rahmen dieser Arbeit führen, weisen jedoch auf eine "Nichteinflussnahme" hin. Die Dicke der Außenwände kann nicht verändert werden.
- Die Kenntnis des Materials der raumumfassenden Flächen lässt keine Rückschlüsse auf eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sommerkondensation zu. Es hat im Rahmen seines Feuchtespeichervermögens und seines hygroskopischen Salzgehaltes Einfluss auf den raumklimatischen Parameter der relativen Luftfeuchtigkeit. Ist es aus sanierungstechnischen Gründen notwendig und denkmalpflegerisch vertretbar, kann ein Wechsel des Materials vorgenommen werden.
- Verfügt das Gebäude über große, nach Süden orientierte Fensterflächen, so kann auch hier die Raumluft durch die Sonneneinstrahlung schneller erwärmt werden. Dies hat wiederum positive Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur der Bauteile. Dieser Faktor ist statisch.
- Ein großes Raumvolumen wirkt als Puffer für die relative Luftfeuchte. Je größer ein Raum ist, desto größer ist auch die Baustoffoberfläche und umso besser können Schwankungen der relativen Luftfeuchte von ihr ausgeglichen werden. Wiederum eine statische Größe.

Lüftung, Beheizung bzw. Temperierung und Nutzung

- Die Faktoren Lüftung und Beheizung sind von den Lüftungs- und Beheizungsmöglichkeiten im Gebäude selbst und dem Umgang mit diesen "Möglichkeiten" abhängig. Wie die Auswertungen gezeigt haben, ist das Auftreten von Sommerkondensation stark vom Lüftungs- und Heizverhalten geprägt. Wird zum falschen Zeitpunkt gelüftet, kann sich die relative Luftfeuchte im Kircheninneren erhöhen und die Wahrscheinlichkeit der Kondensatbildung steigt. Ebenso ist ein zu rasches Aufheizen der Raumluft und die träge Erwärmung der Bauteiloberfläche für die Bausubstanz nicht zuträglich.
- Durch hohe Nutzerzahlen, beispielsweise an kirchlichen Feiertagen, kann das Auftreten von Kondensation ebenfalls gefördert werden. Eine Nutzung der Kirche durch Gottesdienste oder andere Veranstaltungen geht meist einher mit der vorherigen Lüftung oder Beheizung des Gebäudes. Dieser Faktor sowie der vorherige sind veränderlich und lassen sich durch den richtigen Umgang mit diesen Größen beeinflussen.

Summarisch betrachtet sind Kirchen, die in hohem Maß von einem Auftreten von Sommerkondensation betroffen sind, solche, die in Ost-West-Ausrichtung gebaut wurden und stark verschattet werden. Im Weiteren hängen mögliche Kondensationserscheinungen von dem richtigen Lüften und einer Beheizung bzw. Temperierung ab. Bis auf die baulichen Gegebenheiten lassen sich diese Faktoren beeinflussen und damit die Sommerkondensation reduzieren.

Um sich nicht im Bereich einer Prognose zu befinden, sondern eine Diagnose zu stellen, sind bauphysikalische Messungen erforderlich. Die Frage, wie Sommerkondensation diagnostiziert werden kann, muss mit der Unabdingbarkeit der Durchführung dieser Messungen beantwortet werden. Wie bereits in vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben müssen hierzu die thermischen und hygrischen Raum- und Außenluftparameter erfasst werden. Die Messung der Oberflächentemperatur auf den inneren, raumumfassenden Bauteilen und ein Vergleich derer mit einer berechneten Taupunkttemperatur ist obligatorisch. In Verbindung mit der Aufzeichnung von Lüftungszeitpunkten und Nutzerzahlen können Rückschlüsse aus deren Einflussnahme auf die Sommerkondensation gezogen werden. Zusammenhänge können so explizit dargestellt werden und eine Quantifizierung der Sommerkondensation zu bestimmten jahreszeitlichen Zeitpunkten stattfinden.
Die Diagnose der Sommerkondensation setzt einen hohen Aufwand bezüglich der Messgeräte und bauphysikalisches Wissen voraus. Zudem ist sie ein zeit- und kostenaufwändiges Verfahren zur Feststellung, ob Sommerkondensation in einem definierten Messzeitraum aufgetreten ist. Die Anwendung dieses Verfahrens wird empfohlen, wenn Unklarheiten über entstandene Feuchteerscheinungen bestehen und wenn aus denkmalpflegerischen

Gründen eine dezidierte Feststellung notwendig ist, um entsprechende Maßnahmen daraus ableiten zu können. Weitere Untersuchungen zur Abgrenzung der unterschiedlichen Feuchteschäden (aufsteigende Feuchtigkeit, hygroskopische Salze) sind ebenfalls durchzuführen.

Ausgehend davon, welche Kirchen in besonderem Maß gefährdet sind, ist vor allem für die Kirchengemeinden von Bedeutung, anhand welcher Faktoren (Parameter) eine Vorhersage dazu getroffen werden kann, ob Sommerkondensation auftreten wird (rot hinterlegt).
Anhand der Aufstellung in Abb. 7.21 können die in Frage kommenden Faktoren geprüft werden. Dabei sollten die einzelnen Faktoren nicht als einziges (ausschließliches) Kriterium angesehen werden. Häufig liegen Kombinationen dieser Faktoren vor, so dass aus diesen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sommerkondensation abgeleitet werden kann.

Eine Einordnung bezüglich des Klimas kann nicht erfolgen, da sich dieses örtlich und jahreszeitlich zu unterschiedlich darstellt. Ohne baupyhsikalische Messungen und ein, auf die gewonnenen Messwerte abgestimmtes, Lüftungsverhalten kann keine Aussage dazu getroffen werden, ob das jeweilige Klima Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation in der Kirche hat. Es ist daher zweckmäßig und angeraten, das Lüftungsverhalten auf die Klimaparameter abzustimmen (s. Kap. 7.5.1). Aus diesem Grund findet das Klima keinen Eingang in die nachfolgende Grafik.

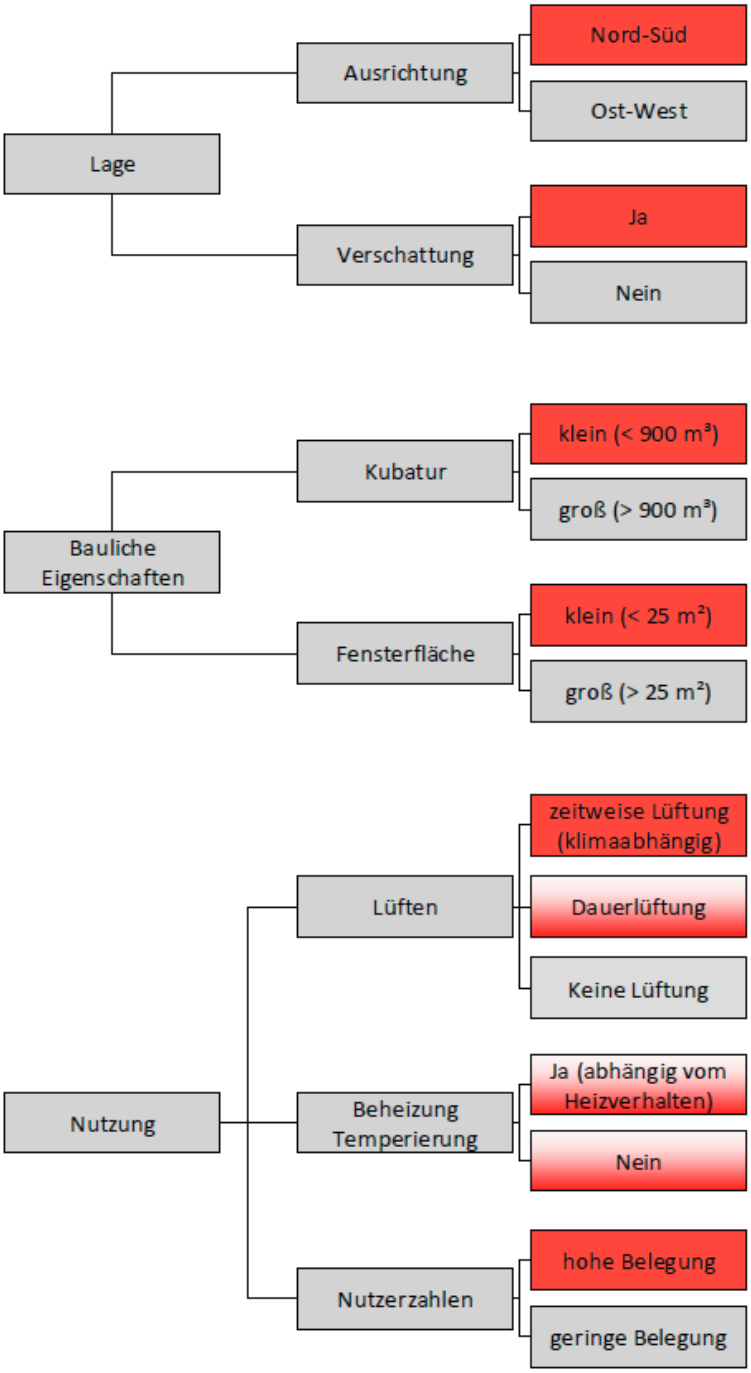


Abb. 7.21: Einflussfaktoren auf das Auftreten von Sommerkondensation

Mit der Kenntnis, welche Faktoren für das Auftreten von Sommerkondensation verantwortlich sind, können Maßnahmen ergriffen werden, die eine Reduzierung bzw. Vermeidung dieses Phänomens ermöglichen. In erster Linie sind hier die Beheizung bzw. Temperierung des Gebäudeinneren zu nennen, sowie ein, den klimatischen Verhältnissen angepasstes Lüftungsverhalten. Diesem Themengebiet ist das folgende Kapitel gewidmet.

8 Maßnahmen zur Schadensreduzierung und -vermeidung

Der Reduzierung bzw. Vermeidung von Sommerkondensation kommt zur Abwendung von Feuchteerscheinungen und damit eventuell verbundenen Schäden an der Bausubstanz und den Einrichtungsgegenständen eine große Bedeutung zu. Da die denkmalgeschützte Bausubstanz und die Bauteiloberflächen in der Regel in ihrem Erscheinungsbild erhalten bleiben sollen, sind bauliche Maßnahmen wie beispielsweise das Anbringen einer Wärmedämmung häufig nicht möglich. Es ist daher nach Lösungsmöglichkeiten zu suchen, die das Gebäude in seinem Habitus erhält und größtmögliche Rücksicht auf die denkmalpflegerischen Belange nimmt.

Eine einfache und kostengünstige Maßnahme ist eine sachgemäße Lüftung des Gebäudes. Dadurch wird eine Reduzierung des Auftretens von Sommerkondensation erreicht. Eine Vermeidung derselben ist nur durch eine Beheizung bzw. Temperierung möglich. Diese Punkte werden in den beiden folgenden Kapiteln erläutert, wobei der Schwerpunkt auf die "richtige Lüftung" gelegt wird. Diese Maßnahme ist kostengünstig, meist sogar kostenneutral, durchzuführen. Die oftmals nicht vorhandenen Möglichkeiten einer Beheizung und Temperierung sowie die einer mechanischen Lüftung setzen den Einbau kostenaufwändiger Anlagen voraus - hier sind jedoch in den meisten Kirchengemeinden kaum oder keine finanziellen Mittel vorhanden. Aus diesem Grund werden diese Maßnahmen nur kurz beschrieben und im Weiteren auf die einschlägige Fachliteratur zu diesem Thema verwiesen.

8.1 Beheizung und Temperierung

In DIN EN 15759-1 "Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 1: Leitfäden für die Beheizung von Andachtsstätten" werden folgende Beheizungsstrategien genannt:

Tabelle 1 — Beheizungsarten

Grundstrategie	Räumliche Verteilung	Zeitliche Verteilung
Keine Heizung		
Konservatorisches Heizen	Allgemeine Beheizung Lokale Beheizung	Ständige Beheizung Zeitweilige Beheizung
Heizen für Behaglichkeit	Allgemeine Beheizung Lokale Beheizung	Ständige Beheizung Zeitweilige Beheizung Beheizung im Mischbetrieb

Abb. 8.1: Auszug aus DIN EN 15759-1: Beheizungsarten[122]

[122] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 13.

Unter Punkt 3 der Norm werden die in der Tabelle verwendeten Begriffe wie folgt definiert[123]:

Konservatorisches Heizen:
Beheizung eines Gebäudes zur Verbesserung des Raumklimas zu konservatorischen Zwecken

Thermische Behaglichkeit:
Gemütszustand der Zufriedenheit mit der thermischen Beschaffenheit der Umgebung

Allgemeine Beheizung:
Beheizung des gesamten Gebäudevolumens

Lokale Beheizung:
Beheizung eines begrenzten Bereichs innerhalb eines Gebäudes

Ständige Beheizung:
Durchgängige Beheizung eines Gebäudes während der gesamten kalten Jahreszeit

Zeitweilige Beheizung:
Beheizung eines Gebäudes nur für begrenzte Zeiträume

Beheizung im Mischbetrieb:
Kombination aus ständiger und zeitweiliger Beheizung: die Andachtsstätte wird dauerhaft auf einer niedrigen Temperatur gehalten und kurz vor der Nutzung auf eine höhere Temperatur gebracht

Die zur Vermeidung von Sommerkondensation sinnvolle Beheizungsart ist das konservatorische Heizen. Ein Heizen, um eine thermische Behaglichkeit für die Nutzer zu erreichen, stellt in Bezug auf die Kondensation eine untergeordnete Rolle dar. Ob und in welchem Umfang geheizt werden kann hängt von den Heizmöglichkeiten im Gebäude ab. So wird mit einer Bankheizung nur eine zeitweilige Beheizung möglich sein, wohingegen mit einer Wandheizung eine ständige Beheizung gewährleistet wird.
Ziel einer Beheizung als Präventionsmaßnahme gegen das Auftreten von Sommerkondensation ist die Erhöhung der Oberflächentemperatur und die Herstellung eines Raumklimas, bei denen eine Taupunktunterschreitung nicht eintritt.

[123] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 6f.

8.1.1 Heizsysteme

In DIN EN 15759-1 werden die sechs gebräuchlichsten Heizsysteme in Andachtstätten mit ihrer Funktionsweise und Anwendung unter den Gesichtspunkten einer konservatorischen sowie einer thermischen Behaglichkeit dargestellt. In Anlehnung an die Aufstellung unter Punkt "8 Heizsysteme und ihre Anwendung"[124] der DIN werden im Folgenden die einzelnen Heizsysteme in Ihrer Funktionsweise vorgestellt und anhand einer tabellarischen Auflistung die Vor- und Nachteile dieser Systeme aufgezeigt. Dies sind insbesondere deren Einsetzbarkeit für die thermische Behaglichkeit, die Berücksichtigung der konservatorischen Aspekte sowie die bauphysikalischen Auswirkungen. Hierzu zählt der Einfluss des Systems auf eine Erhöhung bzw. Minderung der relativen Luftfeuchte, der Raumluft- und der Oberflächentemperatur. Ebenso zählt die Erhöhung einer Luftbewegung und einer damit einhergehenden Verschmutzung durch aufgewirbelten Schmutz zu einer der dargestellten Kriterien. Ergänzt wird die Aufstellung durch eine Darstellung in wie weit Eingriffe in die Bausubstanz notwendig sind bzw. mit welchen denkmalpflegerischen Einschränkungen zu rechnen ist. Das optische Erscheinungsbild und die Belästigungen durch Schallemissionen sind ein weiteres Kriterium. Die Regulierbarkeit des Heizsystems, der Kostenaufwand und die Einsatzmöglichkeit zur Vermeidung des Auftretens von Sommerkondensation schließen die Auflistung ab. Die einzelnen Parameter werden hinsichtlich deren Vor- und Nachteilen entsprechend zugeordnet.

Warmluftheizung

Die aus dem Gebäude abgezogene Raumluft wird auf eine festzulegende Temperatur aufgeheizt. Bei zentralen Systemen wird sie durch Unterflurkanäle und Öffnungen im Fußraum wieder in das Rauminnere geleitet. Bei dezentralen Systemen werden einzelne Heizgeräte an den gewünschten Stellen (Empore, Wände, unterhalb der Kirchenbänke, etc.) aufgestellt.

Vorteile
• Einsatz zum Erreichen einer thermischen Behaglichkeit möglich, da der Raum durch Konvektion schnell aufgeheizt wird. • Verbesserung der Luftqualität durch Beimischung von Außenluft möglich (zentrales System). • Einsatz dezentraler Systeme möglich - daher örtlich und zeitlich flexibel einsetzbar • Gute Regulierbarkeit • Einsatz an kalten Luftzonen (Fenster und Außenwände) möglich - dadurch Erhöhung der Oberflächentemperatur an diesen Stellen. • Geringe Anlage- und Betriebskosten

[124] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 15-20.

Nachteile
• Bei einer Auslegung des Systems zu konservatorischen Zwecken müssen zahlreiche Faktoren berücksichtigt werden (z.B. thermische Schichtung der Luft, Anordnung und Ausrichtung der Luftauslässe). • Durch die schnelle Aufheizung erfolgt ein rascher und damit unerwünschter Wechsel der relativen Luftfeuchte. • Luftbewegungen durch Konvektion - dadurch Verschmutzung durch Staub und das Auftreten von Zuglufterscheinungen und Geräuschemissionen möglich. • Einsatz von Filtern notwendig - damit werden Wartungsarbeiten erforderlich. • Ein nachträglicher Einbau eines zentralen Systems stellt einen erheblichen Eingriff in die Bausubstanz dar und ist kostenintensiv. • Die Raumschale wird erst sekundär erwärmt.
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
eingeschränkt nutzbar

Infrarotheizung

Bei Infrarotheizungen findet die Erwärmung von Bauteiloberflächen, Gegenständen und Menschen über eine Wärmestrahlung statt, ohne die zwischen dem Emittenten und dem Imminenten liegende Luft zu erwärmen. Eine Erwärmung der Luft erfolgt erst indirekt über die Raumoberfläche des erwärmten Körpers.[125]

Vorteile
• Weist ein gutes Regelungsverhalten mit geringer Vorheizzeit auf und ist daher für eine thermische Behaglichkeit gut einsetzbar. • Bei einem örtlich begrenzten Einsatzbereich wird das Raumklima nicht negativ beeinflusst. • Die Beheizung kann zeitlich begrenzt erfolgen. • Kostengünstiges Heizsystem
Nachteile
• Durch den, bei der Verbrennung (gasbetriebene Heizgeräte) entstehenden, Wasserdampf erhöht sich die relative Luftfeuchte. • Ebenfalls können bei gasbetriebenen Heizstrahlern Geräusch- und Lichtemissionen auftreten. Die Lagerung und Verteilung des Brennstoffs muss hinsichtlich der Brandschutzvorschriften erfolgen. • Optische Einschränkungen durch das Erscheinungsbild der Strahler möglich. • Durch konvektive Luftbewegungen ist das Auftreten von Staubablagerungen möglich. • Bei temperaturempfindlichen Materialien ist eine Verwendung nicht angeraten.
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
nicht geeignet

[125] Dahm 2010, S. 76.

Heizkörper

Durch den Einsatz von elektrisch oder mit heißem Wasser betriebenen Heizelementen (Radiatoren, Konvektoren) wird die unmittelbare Umgebung durch Wärmestrahlung erwärmt.

Vorteile
• Die Beheizung kann zeitlich begrenzt erfolgen. • Gutes Regelungsverhalten mit geringer Vorheizzeit - je nach Einbauort gut für die thermische Behaglichkeit einsetzbar. • Kostengünstiges Heizsystem
Nachteile
• Nur bei kleinen Räumen sinnvoll anzuwenden, da Heizkörper eine räumlich begrenzte Wirksamkeit aufweisen. • Durch eine mögliche konvektive Luftbewegung und dadurch entstehende Staubablagerungen unter konservatorischen Aspekten nur bedingt einsetzbar. • Einschränkung des optischen Erscheinungsbildes ist (je nach Einbauort) möglich. • Bei Verlegung von Rohrleitungen wird die Bausubstanz partiell beschädigt.
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
nicht geeignet

Wandheizung

Hierbei handelt es sich um eine Flächenheizung. Mittels beheizter Rohre, Matten oder Platten, die unter oder über dem Putz verlegt sind, wird die innere Oberfläche der Gebäudehülle erwärmt.

Vorteile
• Zur Temperierung geeignet • Es stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung. Daher sind Wandheizung flexibel einsetzbar. • An kritischen Stellen (Ecken, untere Wandbereiche) wird die Oberflächentemperatur erhöht. • Staubablagerungen durch Luftbewegungen sind gering.
Nachteile
• Je nach System nur mit erheblichem Eingriff in die Bausubstanz möglich. • Der Grad der thermischen Behaglichkeit hängt von der zugeführten Wärmemenge ab - er kann ggf. nicht erreicht werden. • Der Einbau ist bei Oberflächen mit hohem denkmalpflegerischen Wert oder bei salzbelasteten Oberflächen nicht möglich bzw. angeraten. • Träges System
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
geeignet

Fußbodenheizung

Bei einer Fußbodenheizung werden mit unterschiedlichen Medien (Strom, Warmwasser, Warmluft) beheizte Elemente in den Fußboden integriert und erwärmen dessen Oberfläche.

Vorteile
• Hohe thermische Behaglichkeit für die Nutzer. • Bei begrenzter Oberflächentemperatur treten geringe Luftbewegungen auf.
Nachteile
• Bei einem nachträglichen Einbau ist ein erheblicher Eingriff in die Bausubstanz notwendig - der Einbau ist bei Fußböden mit hohem denkmalpflegerischem Wert nicht möglich. • Durch die Luftbewegung entstehen Staubablagerungen. • Kostenaufwändig • Träges System
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
nicht geeignet

Bankheizung

Durch die Anwendung verschiedener Systeme (siehe hierzu DIN EN 15759-1, Punkt 8.6.5) wird die Sitzfläche der Bänke während der Nutzung beheizt.

Vorteile
• Die Beheizung kann zeitlich begrenzt erfolgen. • Gutes Regelungsverhalten mit geringer Vorheizzeit - daher für die thermische Behaglichkeit gut einsetzbar. • Eventuell sinnvolle Ergänzung zu anderen Heizsystemen • Kostengünstiges Heizsystem • Auch bei nachträglichem Einbau ist nur ein geringer Eingriff in die Bausubstanz notwendig.
Nachteile
• Je nach System sind Staubablagerungen durch konvektive Luftbewegungen möglich.
Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation
nicht geeignet

Tabelle 21 stellt zusammenfassend die Eignung der Systeme bezogen auf die Vermeidung des Auftretens von Sommerkondensation dar.

Tabelle 21: Übersicht der Heizsysteme und ihre Eignung zur Vermeidung von Sommerkondensation

Heizsystem	Eignung
Warmluftheizung	bedingt
Infrarotheizung	nein
Heizkörper	nein
Wandheizung	ja
Fußbodenheizung	nein
Bankheizung	nein

Zur Wahl eines geeigneten Heizsystems bietet die DIN EN 15759-1 eine Richtschnur, die hinsichtlich aller Systeme einer Hinzuziehung entsprechender Fachleute bedarf. Neben der Wahl des Systems zählt die Dimensionierung in Abstimmung mit den Denkmalpflegebehörden und Restauratoren auch unter der Berücksichtigung des Wärmebedarfs, einer maximal zulässigen relativen Luftfeuchtigkeit und der entsprechenden Lufttemperatur zu den Aufgaben eines "multidisziplinären Teams"[126]. Ebenso müssen die allgemeinen Anforderungen an Gebäude hinsichtlich der Nachhaltigkeit und der Energieeffizienz beachtet werden.

Wie bereits angedeutet, ist das konservatorische Heizen zur Vermeidung der Sommerkondensation geeignet. Unter Punkt 7.2.2 der DIN EN 15759-1 wird hierzu ausgeführt:

> Das sekundäre Ziel von konservatorischem Heizen ist es, die Innenseite der Gebäudehülle warm genug zu halten, um Feuchtekondensation oder Frost zu vermeiden.[127]

Als primäres Ziel wird die Erhaltung eines stabilen und angemessenen Raumklimas hinsichtlich der relativen Luftfeuchte genannt. Schäden in Folge von Schwankungen der relativen Luftfeuchte sollen minimiert und einem biologischen Zerfall vorgebeugt werden.[128]

Vor der Planung des Neueinbaus oder der Veränderung einer bestehenden Heizungsanlage muss dessen Ziel "im Hinblick auf die Erhaltung und Nutzung des Gebäudes klar definiert sein"[129]. Ein stabiles Raumklima (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) verursacht nicht notwendigerweise Schäden an der Bausubstanz oder den Einrichtungsgegenständen. Vielmehr ist der Wechsel der Raumklimawerte - gerade bei einer Beheizung - für die Schadensanfälligkeit ursächlich.

[126] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 8.
[127] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 13
[128] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 13
[129] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 8.

Eine - bis heute noch Anwendung findende - Empfehlung findet sich in einem, in der Zeitschrift "Das Münster" abgedruckten, Tagungsergebnis der Diözesan-Baumeister und Baureferenten aus dem Jahre 1972. Folgende Eckdaten werden vorgegeben[130]:

- Die Raumtemperaturen sollen während der Heizperiode in der Zeit der Nutzung zwischen 12°C und 16°C und während der benutzungsfreien Zeit zwischen 8°C und 10°C liegen.
- Die relative Luftfeuchte soll während der Dauer der Beheizung der Kirche den unteren Grenzwert von 55% rH und den oberen Grenzwert von 75 % rH dauerhaft nicht unter- bzw. überschreiten.
- Die Aufheizgeschwindigkeit pro Zeiteinheit darf einen Maximalwert von 1,0°C pro Stunde nicht überschreiten. Höhere Werte der Aufheizgeschwindigkeit sind in vielen Fällen Ursache für die Schäden am Inventar. Niedrigere Werte sind günstiger.
- Die Temperaturdifferenz über die gesamte Raumhöhe soll nicht mehr als 2,0 °C betragen.
- In Perioden mit sehr niedrigen relativen Luftfeuchten - d. h. kleiner als 45% rH (trockenes Frostwetter) - ist die Innentemperatur um 2-3 °C abzusenken.

Wichtig ist die Einsicht, dass primär in den Frühsommer und Sommermonaten geheizt werden sollte, um das Auftreten von Sommerkondensation zu vermeiden. Hier muss Überzeugungsarbeit geleistet werden, die durch die Vermittlung bauphysikalischer Zusammenhänge erleichtert wird.

In Bezug auf Kirchenheizungen, deren Systeme, Planung, Regelung, Eigenschaften etc. ist umfangreiche, weitere Literatur vorhanden. Neben der bereits aufgeführten DIN 15759-1 "Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima" kann als weiteres Regelwerk VDI 3817 "Technische Gebäudeausrichtung in Baudenkmalen und denkmalwerten Gebäuden" genannt werden. In dieser Richtlinie werden neben Brandschutzanforderungen, Sicherheitstechnik, Elektrotechnik und weiterer Medienversorgung Hinweise auf die Heiz- und Lüftungstechnik in Baudenkmalen gegeben. Die Richtlinie gibt Empfehlungen für fachlich und sachgerechtes Handeln und Hinweise, um Baumängel, Planungsfehler, Nutzungsbeschränkungen oder sonstige Fehlleistungen zu vermeiden.[131]
Einführend und auf die Zusammenhänge zu diesem Themengebiet aufmerksam machend, sei das WTA-Merkblatt Nr. 6-11-12/D "Klima und Klimastabilität historischen Bauwerken"[132] aufgeführt.
Weitere Hinweise zu Kirchenheizungen und den einzuhaltenden Raumklimawerten finden

[130] Baureferenten 1972
[131] VDI 3817, S. 2.
[132] WTA 6-12-11/D:2011-07

sich bei Axel PFEIL in seinem Buch mit dem Titel "Kirchenheizung und Denkmalschutz - Wärmebedarf Feuchtehaushalt Heizungssysteme"[133] und der Publikation von Claus ARENDT unter dem Titel "Raumklima in historischen Gebäuden"[134].
PFEIL nimmt auch im Tagungsband des ICOMOS "Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte"[135] eine Bewertung der Heizsysteme vor und stellt die deren Eignung nach verschiedenen, objektbezogenen Kriterien dar.
Der Autor Henricus SCHELLEN hat unter dem Titel "Heating Monumental Churches. Indoor Climate and Preservation of Cultural Heritage" seine Dissertation[136] veröffentlicht und beschreibt, ebenso wie Alexandra TROI in "Kirchenheizung - Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege"[137], unterschiedliche Heizsysteme in Kirchen.
Etwas allgemeinere, jedoch nicht weniger relevante, Literatur findet sich im Werk von Helmut KÜNZEL "Bauphysik und Denkmalpflege"[138], in welchem er in Kapitel 3 auf das Heizen und Temperieren von Kirchen eingeht.
Ebenso wird im Leitfaden von Christian DAHM mit dem Titel "Energiesparen in Kirchengemeinden"[139] ein Kapitel dem Beheizen von Kirchen gewidmet.

Diese Übersicht stellt nur einen kleinen Ausschnitt an Literatur zum Thema Kirchenheizung dar. In den einzelnen Werken sind weitere Hinweise auf Fachliteratur in umfangreicher Form vorhanden. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass in den unterschiedlichen Werken zum Teil auch verschiedene Werte bezüglich der einzuhaltenden Raumklimaparameter genannt werden. Im Einzelfall sind diese mit den Beteiligten (Denkmalpfleger, Restaurator, Gebäudetechniker, Kirchengemeinden etc.) abzustimmen.

Mit dem Hinweis auf die entsprechende Fachliteratur soll das Themengebiet "Beheizung von Kirchen" im Rahmen der vorliegenden Arbeit abgeschlossen und im Folgenden auf das elementare Thema zur Reduzierung der Sommerkondensation, dem Lüften, eingegangen werden.

[133] Pfeil 1975
[134] Arendt 1993
[135] Arendt 2005, S. 165-184.
[136] Schellen 2002
[137] Troi 2010
[138] Künzel 2007, S. 66-88.
[139] Dahm 2010, S. 63-78.

8.2 Lüftung

Die Norm DIN EN 15759-1 beschäftigt sich mit der Beheizung von Andachtstätten. Unter Punkt 5.4 "Luftaustausch" wird jedoch zutreffend beschrieben, dass der Luftaustausch durch Lüftung (natürliche oder mechanische) oder Undichtigkeiten in der Gebäudehülle einen wesentlichen Einfluss auf das Raumklima haben. Einerseits kann die Luftbewegung durch einen unerwünschten Luftaustausch die thermische Behaglichkeit (Luftzug) und die konservatorischen Aspekte (Verschmutzung infolge von Staubaufwirbelungen) beeinflussen. Andererseits kann eine kontrollierte Lüftung eine Alternative zur Beheizung darstellen, um eine hohe relative Luftfeuchte zu senken.[140]

Im Februar 2016 erschien der Entwurf zu DIN EN 15759-2 " Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 2: Lüftung für den Schutz von Gebäuden und Sammlungen des kulturellen Erbes", in welcher - ergänzend zu Teil 1 der Norm - nun explizit auf die Lüftung schützenswerter Bausubstanz eingegangen wird. Als Gesamtziel der Lüftung wird angegeben, dass "der Grund für einen vorgeschlagenen Eingriff deutlich in Hinsicht auf die Nutzung und Konservierung des Gebäudes sowie der darin enthaltenen Objekte und Sammlungen festgelegt werden" [141] muss. Weiterhin wird auch beschrieben, dass eine Lüftung nicht unbedingt geändert werden muss, sofern das frühere Raumklima keine Beschädigungen verursacht hat.[142]
Da das Auftreten von Sommerkondensation zu Schädigungen an der Bausubstanz und den Einrichtungsgegenständen führt, kommt der "richtigen" Lüftung somit eine große Bedeutung zu, die im Weiteren dargestellt wird. Zunächst wird auf Risiken eingegangen, die durch eine falsche Lüftung verursacht werden.

8.2.1 Lüftungsbezogene Risiken

Das Prinzip des Lüftens zur Vermeidung von Sommerkondensation liegt in der Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit eines Raumes. Zudem kann durch eine Lüftung die Luft im Raum verteilt, aus diesem Wärme abgeführt oder ihm zugeführt werden sowie Einfluss auf Luftschadstoffe genommen werden.
E DIN 15759-2 führt unter Punkt 6.2 die lüftungsbezogenen Risiken auf. Diese sind[143]:
Übermäßige Schwankung der relativen Luftfeuchte
Vor allem eine natürliche Belüftung (s. Kap. 8.2.3) kann zu Schwankungen der relativen

[140] DIN EN 15759-1:2012-02, S. 9.
[141] E DIN EN 15759-2:2016-02, S. 9.
[142] E DIN EN 15759-2:2016-02, S. 9.
[143] vgl. E DIN EN 15759-2:2016-02, S. 10.

Luftfeuchtigkeit führen. Das Ausmaß hängt von der Größe der Öffnung bzw. Spalten ab, durch die - je nach Partialdampfdruckgefälle - Luft in das Gebäude eindringen oder nach außen weggelüftet werden kann. Schwankung der relativen Luftfeuchte sind zu vermeiden, da hierdurch weitere Schadensmechanismen ausgelöst werden.

Hohe relative Luftfeuchte

Durch Feuchtequellen im Gebäude (aufsteigende Feuchtigkeit, Leckagen, Kondensationsvorgänge, hygroskopische Feuchtigkeit, hohe Besucherzahlen) kann die relative Luftfeuchte im Raum ansteigen, wenn ein Luftaustausch nicht gewährleistet ist. Zu hohe Luftfeuchtigkeit führt zu Schädigungen der Bausubstanz und den Einrichtungsgegenständen.

Niedrige relative Luftfeuchte

Findet in den Wintermonaten (i.d.R. niedrige absolute Luftfeuchte außen) ein Luftaustausch durch eine natürliche oder manuelle Lüftung statt, so wird die relative Luftfeuchte im Raum gesenkt. Auch bei einer zu geringen Luftfeuchte setzen Abbauprozesse der Materialien ein. Geben sie Feuchtigkeit ab kann eine Schädigung durch Schrumpfprozesse oder Spannungen einsetzen.

Kondensation von Feuchte

Durch unsachgemäß durchgeführte Lüftungsvorgänge einer manuellen Lüftung oder eine ungewollte natürliche Lüftung ab den Frühjahrsmonaten trifft warm-feuchte Außenluft auf kalte Bauteiloberflächen. Die daraus möglicherweise resultierenden Schäden wurden in Kapitel 4 ausführlich dargestellt.

Salzschaden

Durch übermäßige Lüftung erzeugte Luftströmungen über Wandoberflächen kann die Verdunstung erhöht und damit die Kristallisation von Salzen gefördert werden. Durch die Kristallisation entsteht ein Hydratationsdruck, der in der Folge zu Salzsprengungen führen kann.

Schadstoffe

Mit der einströmenden Luft werden Luftschadstoffe mitgeführt oder durch Luftbewegungen im Raum verteilt. Ein Abführen dieser Schadstoffe ist durch unsachgemäßes Lüften ebenfalls nicht möglich. Infrage kommende Luftschadstoffe können sein: Feinstaub, Schwefeldioxid, Kohlenstoff von Kerzen, Bakterien, Schimmelpilzsporen.

Es ist demnach wichtig, die relative Luftfeuchte in einem Bereich zu halten, der der Bausubstanz und allen Einrichtungsgegenständen zuträglich ist. E DIN 15759-2 empfiehlt die

oben genannten Risiken durch Fachleute aus den Bereichen "Bauwesen, Regelung der Luftbeschaffenheit und Konservierung"[144] einschätzen zu lassen. Die Norm gibt unter Punkt 4 eine Reihenfolge der durchzuführenden Schritte vor, beschreibt deren Zweck und welche Tätigkeiten hierzu erforderlich sind.
Die Einhaltung dieser Abfolge ist vor allem bei einem Einbau einer mechanischen Lüftung angeraten und anzuwenden. Da in den untersuchten Kirchen ein Einbau solcher Anlagen - meist aus Kostengründen - nicht möglich ist, wird nur kurz auf diese Lüftungsmöglichkeit eingegangen.

8.2.2 Mechanische Lüftung

Unter einer mechanischen Lüftung wird - im Sinne der Herabsetzung der Luftfeuchtigkeit - die Entfeuchtung des Raumes mit Hilfe von Geräten verstanden. Hierbei werden Luftentfeuchter oder Klimaanlagen eingesetzt. Ferner können Lüftungseinrichtungen eingebaut werden, die ein luftfeuchteabhängiges Öffnen von Fenstern und Türen ermöglichen.

Luftentfeuchter
Luftentfeuchtungsgeräte verringern den absoluten Luftfeuchtegehalt in einem Raum. Die Luft wird "getrocknet". Zwei Methoden finden hier Anwendung:
Die Luft wird unter die Taupunktemperatur gekühlt, dabei Wasser ausgeschieden und gesammelt.[145] Eine regelmäßige Wartung (Entleeren des Wasserbehälters) ist notwendig.
Wird die angesaugte Luft nacherwärmt, tritt eine gewisse Raumerwärmung ein.[146] Die Auslegung der Geräte erfolgt nach der Raumgröße und der gewünschten Entfeuchtungsleistung.
Eine weitere Methode ist die Adsorption des Wasserdampfes durch hygroskopische Stoffe (z.B. Kieselgel). Die getrocknete Luft tritt bei frei werdender Adsorptionswärme mit erhöhter Temperatur aus.[147]

Klimaanlagen
Diese können Luftzustandsänderungen in Form von Erwärmung, Kühlung, Befeuchtung und Entfeuchtung vornehmen[148]. Eine Klimaanlage ist eine raumlufttechnische Anlage, die selbstständig die Luftfeuchte auf einen vorgegebenen Wert einreguliert. Bei Erreichen eines vorgegebenen Grenzwertes schaltet sich die Klimaanlage selbstständig ein oder aus und macht eine Beaufsichtigung obsolet.

[144] E DIN EN 15759-2:2016-02, S. 7.
[145] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 1407.
[146] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 1407.
[147] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 1408.
[148] Schramek (Hrsg.) 2011, S. DVD 1740.

Sowohl die Luftentfeuchter als auch die Klimaanlagen erfordern einen ausreichend großen Platz zur Aufstellung sowie einen Stromanschluss. In welchem Umfang elektrische Energie benötigt wird, hängt von der Entfeuchtungsleistung und der Zeit ab, in der das Gerät in Betrieb ist. Hohe Betriebskosten können, neben den Anschaffungskosten, die Folge sein. Je nach verwendeter Geräteart kann die Geräuschentwicklung (Anspringen und Betrieb) die Nutzung des Gebäudes beeinträchtigen. Zudem müssen diese Geräte frostfrei gehalten werden.

Bei großen Raumvolumina der Gebäude ist eine Nutzung solcher raumlufttechnischen Anlagen als Einzelgerät nicht sinnvoll, da der Wirkungsgrad nicht ausreicht, um das gesamte Raumluftvolumen in ausreichendem Maße zu entfeuchten. Die Auslegung der Geräteleistung in jedem Fall durch einen Fachmann hinsichtlich der Zielsetzung und der Anforderungen in Absprache mit den Denkmalpflegern vorzunehmen.

Eine Automatisierung der Lüftung ist durch die mechanische Öffnung von Fenstern und Türen mittels Stellmotoren und Schließanlagen möglich. Diese können mit einer Regelung versehen werden, die bei vorgegebenen Klimawerten über Steuerungselemente geöffnet oder geschlossen werden. Es ist darauf zu achten, dass Witterungseinflüsse wie starker Wind, Regen oder Sturm ebenfalls zum Schließen der Fenster führen, da sonst noch größere Schäden zu erwarten ist. Unter Umständen ist eine Vogelsicherung einzubauen[149] und die Funktion unter Frosteinfluss sicherzustellen.
Ist eine Lüftung über die Fenster nicht möglich, so ist der Einbau von motorgesteuerten Ventilatoren erforderlich. Inwieweit diese in denkmalgeschützte Objekte eingebaut werden können, ist im Einzelfall zu prüfen.
Eine Wartung dieser Steuerungseinrichtungen ist notwendig und verursacht, neben den hohen Anschaffungs- und Einbaukosten, weitere Folgekosten.

Der Vorteil einer mechanischen Lüftung liegt in der genauen Regelung der Luftfeuchtewerte. Diese lässt sich durch eine natürliche (ungewollte) und eine manuelle Lüftung per Hand nicht erreichen. Insbesondere die natürliche Lüftung stellt eine Sonderform der Lüftung dar und wird nachfolgend beschrieben.

8.2.3 Natürliche Lüftung

Per Definition in E DIN EN 15759-2 wird unter natürlicher Belüftung ein Prozess verstanden, "in dem Luft durch natürliche Kräfte durch Spalten in der Gebäudehülle (Infiltration) und

[149] Arendt 2005, S. 181.

Öffnungen (Lüftung) in das Gebäude eintritt und durch undichte Stellen, Öffnungen, Dachauslässe oder Lüftungsschächte aus dem Gebäude austritt"[150].
Es ist demnach davon auszugehen, dass dieser Lüftungsprozess ungewollt ist, da eine Regelung nicht stattfinden kann.
"Spalten in der Gebäudehülle" entstehen bei Kirchen primär durch undichte Fenster. Die Spaltmaße der Fensterrahmen und Fensterflügel sind im Regelfall bei Fenstern alter Bauart sehr groß. Bei den untersuchten Kirchen wurden mittels eines Papierstreifentests Untersuchungen durchgeführt, um die Fugendichtheit der Fenster und Türen zu prüfen. Hierbei wird ein Papier zwischen den Flügel und den Rahmen gelegt, das Fenster geschlossen und durch ein Ziehen am Papier geprüft, ob sich dieses widerstandsfrei entfernen lässt. Liegt dieser Zustand vor, ist eine Fugendichtheit nicht gegeben. Eine solche Infiltrationsmöglichkeit lag bei allen Kirchen vor.
Bei der Kirche in Hindenburg wurde eine "natürliche Lüftung" dadurch herbeigeführt, dass Ende Mai ein Gazefenster eingesetzt wurde, das den Fensterflügel ersetzte. Entfernt wurde dieses Mitte September. Sommerkondensation ist nach Einsetzen des Fensters nicht aufgetreten, da sich die Raumluft in der Kirche zu diesem Zeitpunkt bereits auf über 14°C erwärmt hatte, an der kältesten Stelle am Messpunkt Nord unten eine Oberflächentemperatur von 11,6°C gemessen wurde und der Taupunktabstand bei über 1 K lag. Die relative Luftfeuchtigkeit stieg in den ersten 24 Stunden zunächst von 77% rH auf 79,5% rH an, um dann auf einen Wert von 75,4% rH zu sinken. Eine Gefahr des Auftretens von Sommerkondensation bestand durch diese Art der Lüftung nicht. Diese Feststellung kann jedoch nicht generalisiert auf alle Kirchen werden, da Kondensationserscheinungen von vielen Parametern abhängen. Bei der Kirche in Hindenburg lagen günstige Bedingungen vor.

Nach PFEIL ist bei Kirchen, die "aufgrund der üblicherweise anzutreffenden, exponierten freien Lage mit verstärktem Windanfall"[151] zu rechnen. Insbesondere bei bleiverglasten Fenstern treten große Undichtigkeiten auf. Es mit einer Luftwechselrate von 1,0 bis 2,0 h^{-1} zu rechnen. Undichte Fenster ohne Bleiverglasung weisen einen 0,5 bis 1,0-fachen Luftwechsel auf[152].

Um zu prüfen, wie hoch die Luftwechselrate und damit die Undichtigkeiten in der Kirche sind, muss mittels dem Blower-Door-Verfahren der Differenzdruck festgestellt werden.

Durch diese unerwünschte "Lüftungsart" der natürlichen Lüftung wird unter Umständen eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Kircheninneren erreicht, die zu Kondensationsprob-

[150] E DIN EN 15759-2:2016-02, S. 7.
[151] Pfeil 1975, S. 24.
[152] Pfeil 1975, S. 24f.

lemen führen kann. Eine gezieltere Lüftungsmöglichkeit und damit ein rascheres Herabsetzen der relativen Luftfeuchte lässt sich durch eine manuelle Lüftung per Hand erreichen.

8.2.4 Manuelle Lüftung

Eine manuelle Lüftung erfolgt durch das Öffnen und Schließen der Fenster und Türen durch eine beauftragte Person nach vorgegebenen Klimabedingungen.

Ein Lüften ist nur dann sinnvoll, wenn die Außenluft eine niedrigere absolute Luftfeuchte aufweist als die Innenluft bzw. die Taupunkttemperatur innen höher (mindestens 1 Kelvin) ist als außen.

Zuvor ist mit den Denkmalpflegern und Restauratoren der Bereich der Raumklimaparameter (Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) abzustimmen. Minimale und maximale Werte müssen festgelegt und einer verantwortlichen Person die Bedeutung der Einhaltung dieser Grenzwerte vermittelt werden. Jede Kirche hat aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialien der Raumschale und der Einbauten voneinander abweichende Grenzbereiche.

Absolute Luftfeuchte
Dies setzt einen Vergleich der beiden Luftfeuchten innen und außen voraus. Messfühler, die diese Werte aufnehmen, werden im Inneren der Kirche und im geschützten Außenbereich angebracht. Es stehen Messeinrichtungen zur Verfügung, die eigenständig die Werte der relativen Luftfeuchte und der Temperatur messen und diese in eine absolute Luftfeuchtigkeit umrechnen können. Durch "Lüftungsampeln" wird angezeigt, ob ein Lüften zu einem bestimmten Zeitpunkt angeraten ist oder nicht.
Bereits mit kostengünstigen Thermo-Hygrometern kann der richtige Lüftungszeitpunkt über die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur bestimmt werden. Eine verantwortliche Person liest die Klimawerte außen und innen auf dem Hygrometer ab und kann - bei Vorliegen der entsprechenden Lüftungsbedingungen - die Fenster und Türen öffnen bzw. schließen.

Die pauschale Regelung nach KÜNZEL, "dass bei warm-feuchter Witterung nicht gelüftet werden soll, eher bei kühlerem Wetter"[153] kann nicht gänzlich zugestimmt werden, da der Mensch kein "Gefühl" für die Werte einer relativen Luftfeuchte hat. Eine Verdeutlichung, dass die exakte Kenntnis dieser Luftfeuchte wichtig ist, kann anhand von Rechenbeispielen aufgezeigt werden.

Mittels der in Kapitel 2.3 dargestellten und nach der absoluten Luftfeuchte (auch Wasserdampfkonzentration c) umgestellten Formel lässt sich berechnen, wie viel Feuchtigkeit sich

[153] Künzel 2002, S. 103.

- absolut gesehen - in der Luft befindet.

Formel 8.1 $$c = \phi \cdot c_s \quad [g/m^3]$$

c	absolute Luftfeuchte	g/m³
Φ	relative Luftfeuchtigkeit	-
c_s	Wasserdampfsättigungskonzentration	g/m³

Beispiel:

Vorliegende Klimaparameter

Frühsommertag:	relative Luftfeuchte außen:	55% rH
	Lufttemperatur außen:	18°C
	relative Luftfeuchte innen:	70% rH
	Lufttemperatur innen:	8°C

Unter Berücksichtigung der Werte für die Wasserdampfsättigungskonzentration c_s nach Tabelle 1 errechnet sich eine absolute Luftfeuchtigkeit außen von 8,43 g/m³ und innen von 5,78 g/m³.

Da die Luft bestrebt ist, einen Ausgleich der Wasserdampfsättigungskonzentration herbeizuführen und somit vom höheren zum niedrigeren Potenzial "wandert", wird im vorliegenden Fall die Luft in das Gebäude gelüftet.

Obwohl die relative Luftfeuchte im Raum höher ist als im Außenbereich ist - absolut gesehen - die Luft außen feuchter. Ebenso ist die Lufttemperatur innen kälter als außen.

Dass ein Lüften zu diesem Zeitpunkt nicht den gewünschten Effekt bringt, nämlich die relative Luftfeuchte im Inneren zu senken, ist für den bauphysikalischen Laien schwer verständlich.

Sinkt die Lufttemperatur außen bei gleichbleibender relativer Luftfeuchte in den Abendstunden auf einen Wert von 10°C, so berechnet sich eine absolute Luftfeuchtigkeit von 5,16 g/m³. Ein Lüften zu diesem Zeitpunkt wäre dann als "richtiges Lüften" einzuordnen, da sich im Außenbereich trockenere Luft befindet als im Inneren der Kirche.

Die zweite Möglichkeit herauszufinden, ob ein Lüften sinnvoll ist, kann durch die Berechnung der Taupunkttemperatur erfolgen (s. Rechenbeispiel in Kap. 2.5).

Da die Berechnung der absoluten Luftfeuchtigkeit oder der Taupunkttemperatur im Einsatz in einer Kirche nicht praktikabel sind, können hilfsweise Tabelle 22 oder das Diagramm in Abb. 8.2 eingesetzt werden. Um die Tabelle bzw. das Diagramm anwenden zu können, muss ein Thermo-Hygrometer vorhanden sein, dass die Werte der Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte innen und außen misst und anzeigt. Bezüglich des Aufstellortes muss beachtet werden, dass die Fühlerelemente nicht einer direkten Sonneneinstrahlung

ausgesetzt sind und sie vor weiteren Umwelteinflüssen (Regen, Frost) geschützt angebracht werden. Der Einsatz eines Hygrometers setzt eine dauerhafte Messung voraus, benötig jedoch einen geringen Wartungssaufwand (Wechsel der Batterien).

Nachteilig bei dieser Art des "Herausfindens" des richtigen Lüftungszeitpunktes ist der zeitliche Aufwand der verantwortlichen Person. Da sich innerhalb eines Tages möglicherweise mehrfach der richtige Lüftungszeitpunkt einstellen, sich aber durch die tageszeitabhängigen Klimaschwankungen ändern kann, muss das Ablesen der Klimawerte häufiger erfolgen. Es wird von den beauftragten Personen ein hohes Maß an Verantwortung und Bereitschaft gefordert, um Schäden durch das Auftreten von Sommerkondensation durch ein sachgemäßes Lüften zu reduzieren.

Tabelle 22: Absolute Luftfeuchtigkeit in g/m³ bei einem Temperaturbereich von -20°C und 30°C

Lufttem-peratur	Relative Luftfeuchtigkeit																		
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
-20°C	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,31	0,35	0,40	0,44	0,48	0,53	0,57	0,62	0,66	0,70	0,75	0,79	0,84	0,88
-19°C	0,10	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34	0,38	0,43	0,48	0,53	0,58	0,62	0,67	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,96
-18°C	0,11	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,42	0,47	0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,79	0,84	0,89	0,95	1,00	1,05
-17°C	0,12	0,17	0,23	0,29	0,35	0,40	0,46	0,52	0,58	0,63	0,69	0,75	0,81	0,86	0,92	0,98	1,04	1,09	1,15
-16°C	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,44	0,50	0,57	0,63	0,69	0,76	0,82	0,88	0,95	1,01	1,07	1,13	1,20	1,26
-15°C	0,14	0,21	0,28	0,35	0,41	0,48	0,55	0,62	0,69	0,76	0,83	0,90	0,97	1,04	1,10	1,17	1,24	1,31	1,38
-14°C	0,15	0,23	0,30	0,38	0,45	0,53	0,60	0,68	0,76	0,83	0,91	0,98	1,06	1,13	1,21	1,28	1,36	1,43	1,51
-13°C	0,17	0,25	0,33	0,41	0,50	0,58	0,66	0,74	0,83	0,91	0,99	1,07	1,16	1,24	1,32	1,40	1,49	1,57	1,65
-12°C	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,90	0,99	1,08	1,17	1,26	1,35	1,44	1,53	1,62	1,71	1,80
-11°C	0,20	0,29	0,39	0,49	0,59	0,69	0,78	0,88	0,98	1,08	1,18	1,27	1,37	1,47	1,57	1,67	1,76	1,86	1,96
-10°C	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64	0,75	0,85	0,96	1,07	1,17	1,28	1,38	1,49	1,60	1,70	1,81	1,92	2,02	2,13
-9°C	0,23	0,35	0,46	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04	1,16	1,28	1,39	1,51	1,62	1,74	1,86	1,97	2,09	2,20	2,32
-8°C	0,25	0,38	0,50	0,63	0,76	0,88	1,01	1,13	1,26	1,39	1,51	1,64	1,76	1,89	2,02	2,14	2,27	2,39	2,52
-7°C	0,27	0,41	0,55	0,69	0,82	0,96	1,10	1,23	1,37	1,51	1,64	1,78	1,92	2,06	2,19	2,33	2,47	2,60	2,74
-6°C	0,30	0,45	0,60	0,75	0,89	1,04	1,19	1,34	1,49	1,64	1,79	1,94	2,09	2,24	2,38	2,53	2,68	2,83	2,98
-5°C	0,32	0,49	0,65	0,81	0,97	1,13	1,30	1,46	1,62	1,78	1,94	2,11	2,27	2,43	2,59	2,75	2,92	3,08	3,24
-4°C	0,35	0,53	0,70	0,88	1,05	1,23	1,40	1,58	1,76	1,93	2,11	2,28	2,46	2,63	2,81	2,98	3,16	3,33	3,51
-3°C	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,91	2,10	2,29	2,48	2,67	2,86	3,05	3,24	3,43	3,62	3,81
-2°C	0,41	0,62	0,83	1,03	1,24	1,45	1,65	1,86	2,07	2,27	2,48	2,68	2,89	3,10	3,30	3,51	3,72	3,92	4,13
-1°C	0,45	0,67	0,89	1,12	1,34	1,56	1,79	2,01	2,24	2,46	2,68	2,91	3,13	3,35	3,58	3,80	4,02	4,25	4,47
0°C	0,48	0,73	0,97	1,21	1,45	1,69	1,94	2,18	2,42	2,66	2,90	3,15	3,39	3,63	3,87	4,11	4,36	4,60	4,84
1°C	0,52	0,78	1,04	1,30	1,55	1,81	2,07	2,33	2,59	2,85	3,11	3,37	3,63	3,89	4,14	4,40	4,66	4,92	5,18
2°C	0,56	0,83	1,11	1,39	1,67	1,94	2,22	2,50	2,78	3,05	3,33	3,61	3,89	4,16	4,44	4,72	5,00	5,27	5,55
3°C	0,59	0,89	1,19	1,48	1,78	2,08	2,37	2,67	2,97	3,26	3,56	3,85	4,15	4,45	4,74	5,04	5,34	5,63	5,93
4°C	0,63	0,95	1,27	1,59	1,90	2,22	2,54	2,85	3,17	3,49	3,80	4,12	4,44	4,76	5,07	5,39	5,71	6,02	6,34
5°C	0,68	1,02	1,36	1,70	2,03	2,37	2,71	3,05	3,39	3,73	4,07	4,41	4,75	5,09	5,42	5,76	6,10	6,44	6,78
6°C	0,72	1,09	1,45	1,81	2,17	2,53	2,90	3,26	3,62	3,98	4,34	4,71	5,07	5,43	5,79	6,15	6,52	6,88	7,24
7°C	0,77	1,16	1,55	1,93	2,32	2,71	3,09	3,48	3,87	4,25	4,64	5,02	5,41	5,80	6,18	6,57	6,96	7,34	7,73
8°C	0,83	1,24	1,65	2,06	2,48	2,89	3,30	3,71	4,13	4,54	4,95	5,36	5,78	6,19	6,60	7,01	7,43	7,84	8,25
9°C	0,88	1,32	1,76	2,20	2,64	3,08	3,52	3,96	4,40	4,84	5,28	5,72	6,16	6,60	7,04	7,48	7,92	8,36	8,80
10°C	0,94	1,41	1,88	2,35	2,81	3,28	3,75	4,22	4,69	5,16	5,63	6,10	6,57	7,04	7,50	7,97	8,44	8,91	9,38
11°C	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,49	5,99	6,49	6,99	7,49	7,99	8,49	8,99	9,49	9,99
12°C	1,06	1,60	2,13	2,66	3,19	3,72	4,26	4,79	5,32	5,85	6,38	6,92	7,45	7,98	8,51	9,04	9,58	10,11	10,64
13°C	1,13	1,70	2,26	2,83	3,40	3,96	4,53	5,09	5,66	6,23	6,79	7,36	7,92	8,49	9,06	9,62	10,19	10,75	11,32
14°C	1,20	1,81	2,41	3,01	3,61	4,21	4,82	5,42	6,02	6,62	7,22	7,83	8,43	9,03	9,63	10,23	10,84	11,44	12,04
15°C	1,28	1,92	2,56	3,20	3,84	4,48	5,12	5,76	6,40	7,04	7,68	8,32	8,96	9,60	10,24	10,88	11,52	12,16	12,80
16°C	1,36	2,04	2,72	3,40	4,08	4,76	5,44	6,12	6,80	7,48	8,16	8,84	9,52	10,20	10,88	11,56	12,24	12,92	13,60
17°C	1,44	2,17	2,89	3,61	4,33	5,05	5,78	6,50	7,22	7,94	8,66	9,39	10,11	10,83	11,55	12,27	13,00	13,72	14,44
18°C	1,53	2,30	3,07	3,83	4,60	5,37	6,13	6,90	7,67	8,43	9,20	9,96	10,73	11,50	12,26	13,03	13,80	14,56	15,33
19°C	1,63	2,44	3,25	4,07	4,88	5,69	6,50	7,32	8,13	8,94	9,76	10,57	11,38	12,20	13,01	13,82	14,63	15,45	16,26
20°C	1,73	2,59	3,45	4,31	5,18	6,04	6,90	7,76	8,63	9,49	10,35	11,21	12,08	12,94	13,80	14,66	15,53	16,39	17,25
21°C	1,83	2,74	3,66	4,57	5,48	6,40	7,31	8,23	9,14	10,05	10,97	11,88	12,80	13,71	14,62	15,54	16,45	17,37	18,28
22°C	1,94	2,91	3,87	4,84	5,81	6,78	7,75	8,72	9,69	10,65	11,62	12,59	13,56	14,53	15,50	16,46	17,43	18,40	19,37
23°C	2,05	3,08	4,10	5,13	6,15	7,18	8,20	9,23	10,26	11,28	12,31	13,33	14,36	15,38	16,41	17,43	18,46	19,48	20,51
24°C	2,17	3,26	4,34	5,43	6,51	7,60	8,68	9,77	10,86	11,94	13,03	14,11	15,20	16,28	17,37	18,45	19,54	20,62	21,71
25°C	2,30	3,45	4,59	5,74	6,89	8,04	9,19	10,34	11,49	12,63	13,78	14,93	16,08	17,23	18,38	19,52	20,67	21,82	22,97
26°C	2,43	3,65	4,86	6,08	7,29	8,51	9,72	10,94	12,15	13,37	14,58	15,80	17,01	18,23	19,44	20,66	21,87	23,09	24,30
27°C	2,57	3,85	5,14	6,42	7,70	8,99	10,27	11,56	12,84	14,12	15,41	16,69	17,98	19,26	20,54	21,83	23,11	24,40	25,68
28°C	2,71	4,07	5,43	6,79	8,14	9,50	10,86	12,21	13,57	14,93	16,28	17,64	19,00	20,36	21,71	23,07	24,43	25,78	27,14
29°C	2,87	4,30	5,73	7,17	8,60	10,03	11,46	12,90	14,33	15,76	17,20	18,63	20,06	21,50	22,93	24,36	25,79	27,23	28,66
30°C	3,03	4,54	6,05	7,57	9,08	10,59	12,10	13,62	15,13	16,64	18,16	19,67	21,18	22,70	24,21	25,72	27,23	28,75	30,26

Die Werte aus vorstehendem Beispiel sind farbig markiert und bilden ein Ablesebeispiel.

Zwischenwerte werden mit den ungünstigeren Werten angenommen. Dies bedeutet, dass die Werte des Außenklimas aufgerundet und die des Innenklimas abgerundet werden müssen.

Eine grafische Variante stellt Abb. 8.2 dar. Wie Tabelle 22 kann dieses Diagramm in ausgedruckter - möglichst laminierter - Form in der Kirche ausliegen, um den Verantwortlichen eine Hilfestellung zu bieten.

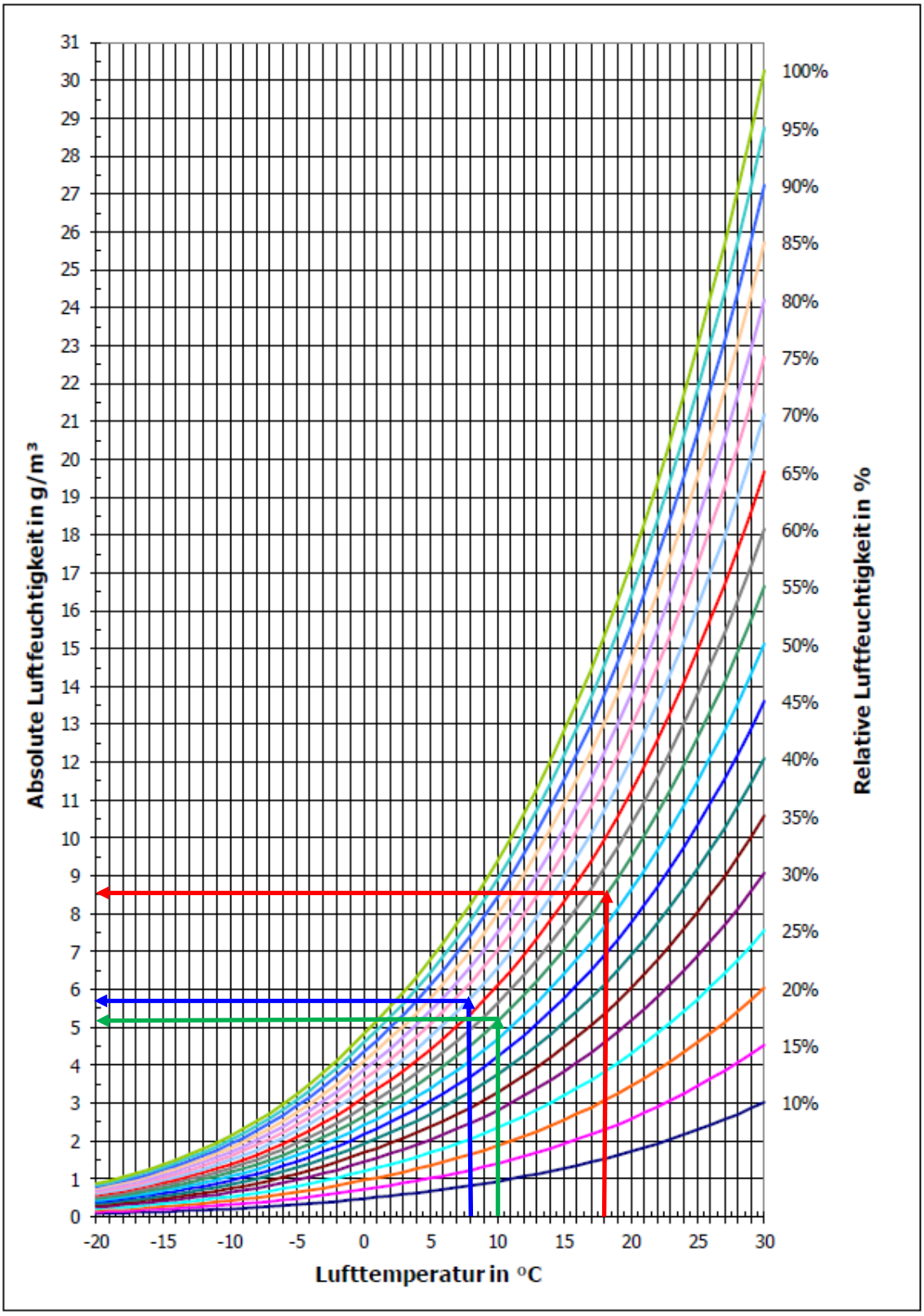


Abb. 8.2: Darstellung der absoluten Luftfeuchtigkeit (erweitertes Carrier-Diagramm)

Die, für das aufgeführte Beispiel, verwendeten Werte sind farbig markiert (rot = außen bei 18°C und 55% rH, blau = innen bei 8°C und 70% rH, grün = außen bei 10°C und 55% rH).

Da dem Lüften eine hohe Bedeutung zur Vermeidung von Sommerkondensation zukommt ist es in erster Linie wichtig, die Verantwortlichen aufzuklären und die bauphysikalischen Zusammenhänge deutlich zu machen. Deren Bestreben, im Frühjahr die warme Außenluft zur Erwärmung der Kirche herein zu lüften, kann erhebliche Feuchteschäden durch Sommerkondensation hervorrufen.[154] Ebenso muss das Verständnis dafür vermittelt werden, dass eine Beheizung ab den Frühsommermonaten - in Ergänzung des "richtigen Lüftens" - eine zweckmäßige Maßnahme zur Vermeidung von Schäden sein kann.

8.3 Heizen oder Lüften

Eine Heizungsunterstützung in den Frühsommermonaten dient der Herabsetzung der relativen Luftfeuchtigkeit im Kirchenraum und einer Erhöhung der Oberflächentemperatur der Bauteiloberflächen. Ob diese Maßnahme einsetzt werden müssen oder können hängt von den festgelegten Rahmenbedingungen ab. Diese werden zum einen durch den Nutzer bestimmt, der Behaglichkeitskriterien aufstellt und das Gebäude unterschiedlich nutzen möchte (Gottesdienste, Konzerte, Ausstellungen). Zum anderen ist dies der Denkmalpfleger, der für die Erhaltung des Denkmalwertes verantwortlich zeichnet und den Schutz des Bauwerks und des Inventars beachtet. Die Interessen der Parteien sind abzuwägen und unter Zuhilfenahme beratender Fachleute eine Entscheidung zu finden. Die Aufstellung der Entscheidungskriterien ist ein iterativer Prozess, der alle Belange berücksichtigen muss. Welche Raumklimaparameter müssen eingehalten werden? Für die Baustoffe, für die Einbauten, für Gemälde, für verschiedene andere Materialien? In welchem Umfang soll die Kirche genutzt werden? Wie viele Personen werden zeitgleich anwesend sein? Welches Heizsystem ist vorhanden? Ist eine zusätzliche Heizung notwendig und wo kann diese aufgestellt werden? Ist die Tragfähigkeit des Aufstellortes gegeben? Wie lässt sich die Heizung regeln? Wie hoch ist der Wartungsaufwand? Welche Lüftungsmöglichkeiten sind vorhanden? Kann die Lüftung durch verantwortungsvolle Personen durchgeführt werden? Diese Aufstellung ist beliebig zu erweitern und stellt nur einen Auszug der Fragen dar, die durch die Beteiligten geklärt werden müssen.

Eine Antwort auf die Frage, ob geheizt oder gelüftet werden soll, kann nicht auf jedes Gebäude übertragen werden und ist im Einzelfall immer auf dieses abzustimmen. Daher kann hier keine pauschale Empfehlung gegeben werden. Als Hilfestellung dient das folgende Diagramm, dass das oben Gesagte nochmals zusammenfassend darstellt.

[154] siehe auch Künzel 2002, S. 106.

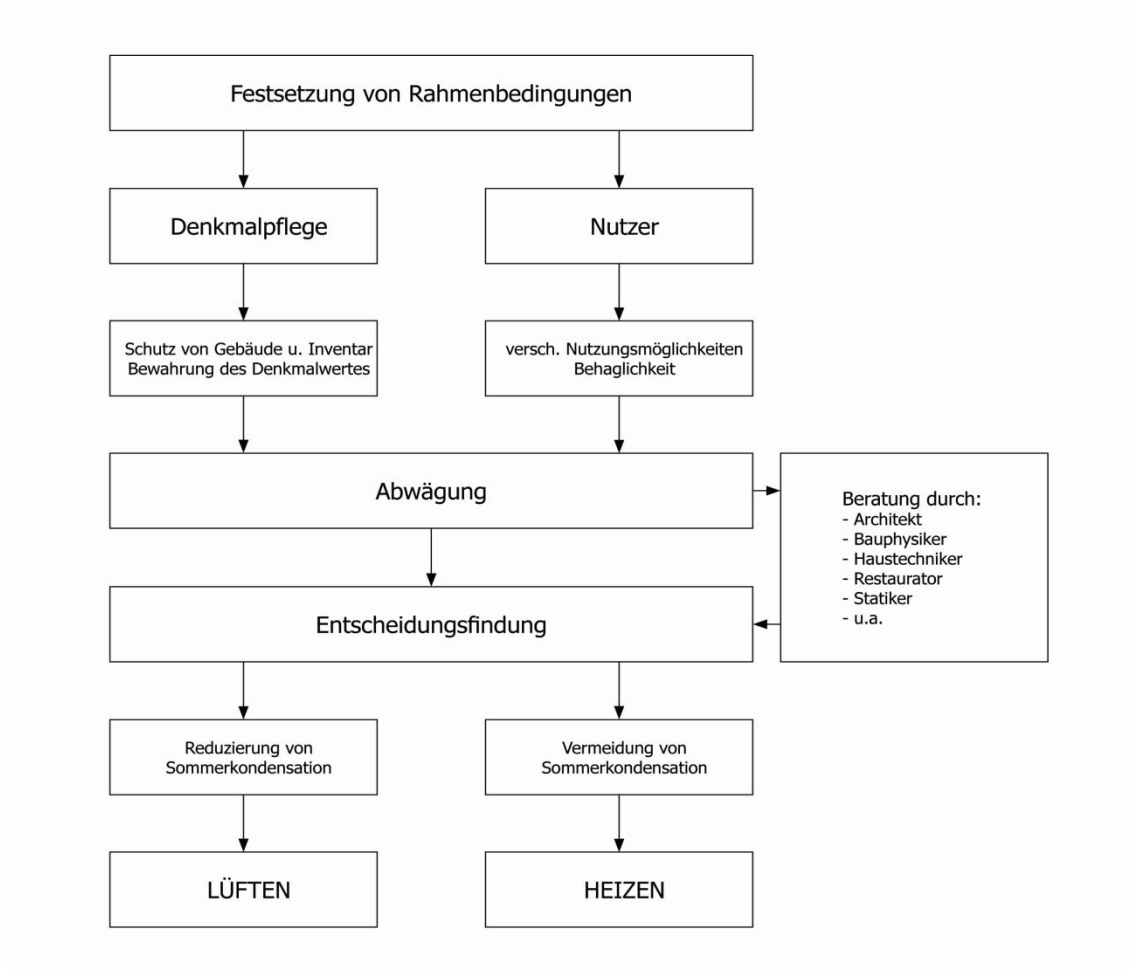


Abb. 8.3: Empfehlung zum Vorgehen bei der Entscheidungsfindung[155]

Neben dem Heizen (bzw. Temperieren) und Lüften können bauliche Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung von Schäden durch Sommerkondensation beitragen.

8.4 Bauliche Maßnahmen

Bauliche Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Sommerkondensation können sein:

- Schleusen
- Wärmedämmung
- Einbau dichter Fenster bzw. Abdichten der Fenster
- Erhöhung der Sorptionsfläche

Eine Schleuse (Windfang, Doppeltür) stellt einen Puffer am Eingang des Gebäudes dar. Die

[155] Schrimpf 2005, S. 69.

Außenluft wird daran gehindert, direkt in den Innenraum zu gelangen und dort zum Auftreten von Sommerkondensation zu führen. Ein Einbau ist nicht in jeder Kirche möglich und denkmalpflegerisch gegebenenfalls nicht vertretbar. Bei einigen der untersuchten Kirchen ist eine "Schleuse" in Form einer Winterkirche eingebaut. Die Außenluft wird durch diese nur am Einströmen in den Kirchenbereich gehindert, nicht jedoch in den Eingangsbereich (meist der Turm).
Der Einbau einer Schleuse unterbindet ausschließlich den Luftstrom im Türbereich. Im Bereich der Fenster müssen andere Maßnahmen - wie der Einbau dichter Fenster - ergriffen werden.

Unter der Voraussetzung, dass der Austausch der Fenster denkmalgerecht geschehen kann, besteht die Möglichkeit undichte oder einfach verglaste Fenster zu ersetzen. Ob dichte Fenster dem Raumklima zuträglich sind, muss im Einzelfall geprüft werden. Ob gegebenenfalls eine Infiltration der Außenluft durch die Fenster mittels Dichtungsbändern unterbunden werden soll, ist unter Rücksichtnahme auf die denkmalpflegerischen Belange ebenfalls zu prüfen.

Desgleichen ist das Anbringen einer Wärmedämmung von verschiedenen Kriterien abhängig. Insofern muss geprüft werden, ob das Ziel einer Wärmedämmung mit den Anforderungen der Denkmalpflege vereinbart werden kann. Als Ziel kann definiert werden, dass die Bauteiloberfläche in den Wintermonaten nicht zu stark auskühlt und somit ein größerer Abstand zwischen Taupunkttemperatur und Oberflächentemperatur gewährleistet wird. Sie dient dem Schutz der Konstruktion gegen thermisch bedingte Dehnungen und Zwängungsspannungen. Bei beheizten oder temperierten Gebäuden dient eine Wärmedämmung dazu, die Wärme im Bauwerk zu halten und damit die Auskühlung der Bauteiloberflächen zu minimieren.
Jedoch sollte man sich bewusst sein, dass eine Optimierung des Gebäudes unter energetischen Gesichtspunkten im Sinne der Energieeinsparverordnung (EnEV) nicht erreicht werden kann. Anforderungen an Kirchengebäude sind dort nicht definiert.

Eine weitere bauliche Maßnahme ist die Erhöhung der Sorptionsfläche. Hierunter wird die Feuchteaufnahme durch Baustoffe verstanden. Durch eine zeitlich verzögerte Abgabe der Feuchte stellt sich eine Desorption ein. Es wird also ein "Feuchtepuffer" eingebaut. Bei auftretenden Feuchtespitzen wird Feuchtigkeit durch die Baustoffe aufgenommen, da zwischen der Oberflächenfeuchtigkeit und der relativen Luftfeuchte ein Ausgleich stattfindet. Eine "Entfeuchtung" der Baustoffe wird durch ein richtiges Lüftungsverhalten unterstützt.
Wie viel Feuchtigkeit ein Baustoff aufnehmen kann, geht aus seinen Sorptionsisothermen hervor. Materialien mit guten Sorptionseigenschaften sind Kalkputze oder Kalksandsteine.

Diese sind durch ihre grobe Porenstruktur in der Lage, große Feuchtemengen aufzunehmen. Gebäude mit einer großen Anzahl an Säulen oder verputzten Wänden (ohne diffusionsdichten Anstrich) sind nicht so häufig von Kondensationsproblemen betroffen, wie Gebäude mit einer Raumschale mit diffusionsdichten Oberflächen[156].
Wie bei den bisher aufgeführten baulichen Maßnahmen ist auch hier eine Prüfung im Einzelfall unter Beachtung der denkmalpflegerischen Belange durchzuführen.

[156] Schrimpf 2005, S. 65.

8.5 Zusammenfassung der Maßnahmen

Das nachfolgende Ablaufdiagramm bietet eine Hilfestellung wie - im Fall einer Beeinträchtigung durch das Auftreten von Sommerkondensation - geeignete Maßnahmen ausgewählt werden können. Das Diagramm ist in Ergänzung der Abb. 3.2, das die Abgrenzung der einzelnen Feuchteschäden darstellt, und der Aufstellung in Tabelle 3 anzuwenden.

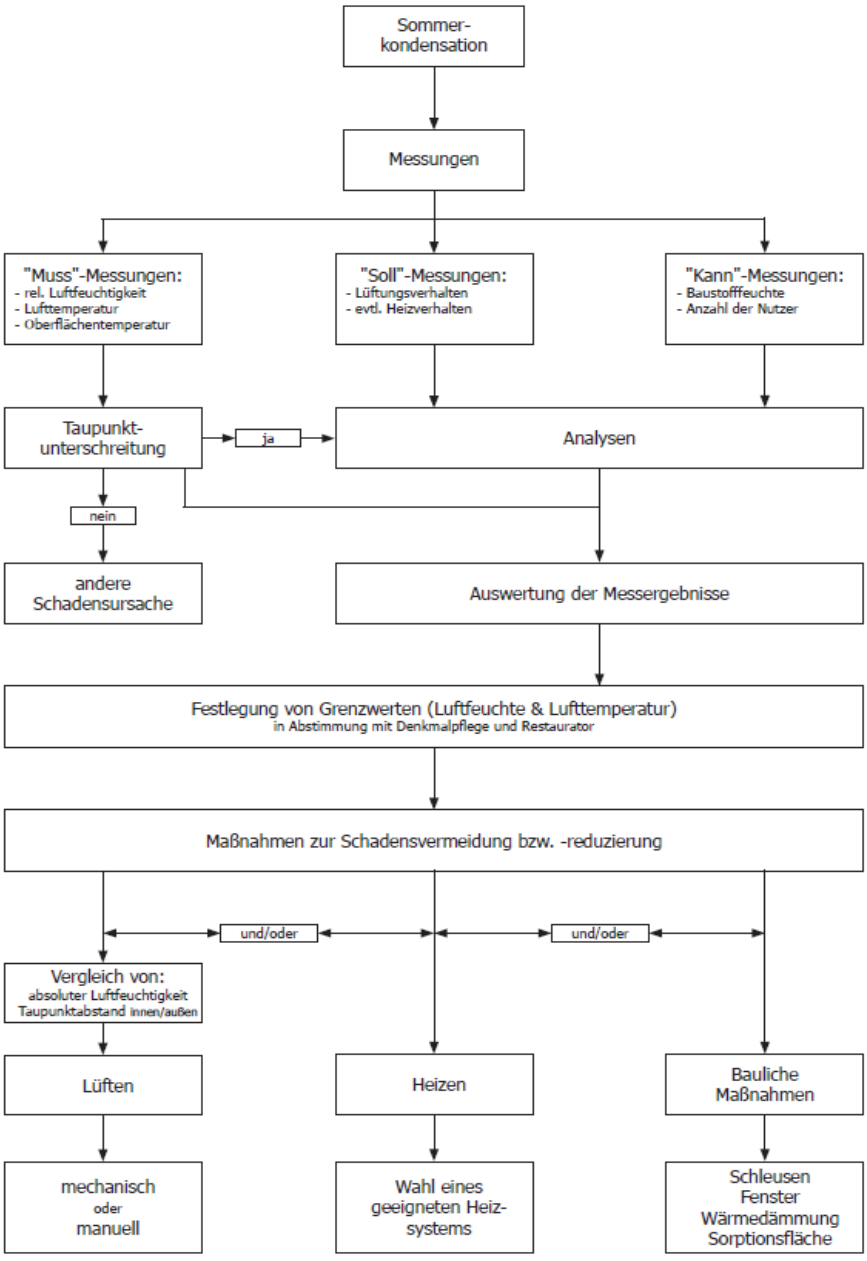


Abb. 8.4: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise bei der Maßnahmenfindung[157]

[157] Schrimpf 2005, S. 67. (überarbeitet)

Wird bei der Begutachtung von historischer Bausubstanz festgestellt, dass Feuchteschäden aufgetreten sind, so kann das Diagramm in Abb. 3.2 in Verbindung mit Tabelle 3 zur Bewertung dieser Schäden dienen. Zunächst werden die Feuchteerscheinungen der "Schadensgruppe" mit den überwiegend anzutreffenden Merkmalen zugeordnet, die beiden anderen Feuchteschadensphänomene jedoch nicht gänzlich vernachlässigt. Sind die "Feuchteschäden" nach näherer Betrachtung der Sommerkondensation zuzurechnen, so sind Messungen unabdingbar. Eine Vorgehensweise nach Abb. 8.4 wird empfohlen.

Um das Auftreten von Sommerkondensation zu reduzieren oder zu vermeiden ist ein zweistufiges System aus Heizen und Lüften angeraten. Bauliche Maßnahmen sind nur begleitend zu betrachten, da sie in denkmalgeschützter Bausubstanz oft nicht angewendet werden können.

Bevor die Entscheidung für eine oder mehrere Maßnahmen getroffen werden kann, müssen die Rahmenbedingungen durch die Denkmalpfleger und Nutzer abgegrenzt werden. Dies bedeutet, dass die Beteiligten sich darüber informieren, welche Nutzung im Gebäude vorgesehen ist, welche Konsequenzen daraus entstehen und welche Maßnahmen vorgesehen sind, die Bausubstanz und das Inventar zu schützen. Bei der Interessenabwägung sollte in jedem Fall der Rat von Fachleuten eingeholt werden. Eine Entscheidungsfindung beinhaltet eine Festsetzung des Denkmalwertes (in wie weit darf/muss/soll das Gebäude und seine Einrichtungsgegenstände geschützt werden) und Konventionen darüber, wie die Nutzung und die daraus folgenden Maßnahmen bezüglich Lüftung, Heizung und baulichen Maßnahmen erfolgen und mit welchen Einschränkungen diesbezüglich zu rechnen ist.[158]

Sommerkondensation tritt häufig in Gebäuden - vor allem Kirchen - auf, die durch ihre dicken Außenmauern die "Winterkälte" speichern und bei denen durch unsachgemäßes Heizen und Lüften ein Gefährdungspotenzial vorliegt. Sie kann durch geeignete Maßnahmen reduziert oder gar vermieden werden. Dies setzt voraus, dass die Verantwortlichen für dieses Feuchteschadensphänomen sensibilisiert werden.

[158] Schrimpf 2005, S. 68.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Sommerkondensation ist kein, nur auf die Jahreszeit des Sommers bezogenes Problem. Sie tritt auf, wenn Gebäude durch das Vorliegen bestimmter Parameter die winterliche Kälte speichern und sich die Bausubstanz nur langsam erwärmen kann. Bei Vorliegen dieser Bedingungen wird (meist) durch ein unsachgemäßes Lüftungsverhalten in den Frühsommermonaten warme Außenluft in das Gebäude gelüftet. Diese Luft bringt viel Feuchtigkeit mit. Im Gebäude stellt sich durch die dort vorhandene, hohe relative Luftfeuchtigkeit schnell eine Sättigung des Wasserdampfes ein. Dieser wird an den kalten Bauteiloberflächen abgekühlt - es kommt zur Sommerkondensation.
Die Untersuchungen und Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit haben ergeben, dass hohe Nutzerzahlen unter Umständen auch zum Auftreten von Sommerkondensation führen können.

Um das Phänomen der Sommerkondensation von weiteren Feuchteerscheinungen wie der aufsteigenden Feuchte oder der hygroskopischen Feuchte abzugrenzen, müssen neben den einzelnen Schadensbildern auch die bauphysikalischen Zusammenhänge bekannt sein. Das durch Sommerkondensation verursachte Schadenspotenzial ist vielschichtig. Es reicht von Abplatzungen der Raumschale über Ablösen von Malschichten bis zu einer Beeinträchtigung der Funktion einer Orgel.

Um festzustellen, ob Sommerkondensation auftritt, müssen mindestens Messungen der

- Relativen Luftfeuchte innen
- Lufttemperatur innen
- Oberflächentemperatur der Bauteiloberfläche innen

erfolgen. Um die jahreszeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen, sollten die Messungen über einen Zeitraum von 12 Monaten durchgeführt werden.
Mit den Werten der Luftfeuchte und der Lufttemperatur wird die Taupunkttemperatur berechnet. Diese wird mit der Oberflächentemperatur des Bauteils verglichen. Liegt die Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur, so tritt Kondensation auf.

Anzuratende Ergänzungen dieser Messungen ist die Erfassung des Außenklimas, der Anzahl der Nutzer und der Lüftungsvorgänge. Diese können Aufschluss darüber geben, unter welchen klimatischen oder nutzerbedingten "Begleitumständen" es zu Kondensat kam.

Weitere Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf die Abgrenzung der Feuchteschäden untereinander, sind die Erstellung eines Feuchtediagramms der Innenoberfläche einer

Außenwand und die Analyse bauschädlicher Salze.
Zur Einschätzung der Feuchteaufnahmefähigkeit der Baustoffe können diese in einem Trockenschrank bzw. Klimaschrank unter definierten Klimabedingungen (relative Luftfeuchte und Lufttemperatur) gelagert werden. Mit den erfassten Messdaten ist es möglich Sorptionsisothermen zu erstellen. Mit diesen kann festgestellt werden, ob ein Baustoff als Feuchtepuffer wirksam werden kann. Diese Untersuchung ist - neben der Probenentnahme für die Analyse der bauschädlichen Salze - eine zerstörende Untersuchung und sollte nur in Absprache mit den Denkmalpflegern vorgenommen werden.
Bei der Feststellung der Feuchteaufnahme durch hygroskopisch wirkende Salze ist eine orientierende Untersuchung durch so genannte Teststäbchen zunächst ausreichend. Werden Auffälligkeiten erkannt, so sind weitere, differenziertere Feststellungen des "Salzgehaltes" notwendig.

Bei allen verwendeten Messgeräten muss deren Funktionsweise und das Messprinzip bekannt sein und auf das Ergebnisziel abgestimmt werden. Dies betrifft beispielsweise die Genauigkeit und die Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Klimabedingungen. Bei den Messfühlern für die Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit muss die Beständigkeit, die Messungen über einen längeren Zeitraum durchzuführen, gewährleistet sein.

Die, in den Kirchen durchgeführten Messungen hatten das Ziel Zusammenhänge zwischen klimatischen und baulichen Bedingungen und dem Auftreten von Sommerkondensation herauszustellen.
Zusammenfassend sei in "Je-Desto-Sätzen" das Ergebnis der Messungen, Untersuchungen und Auswertungen in Bezug auf die Lage und die baulichen Eigenschaften dargestellt und kurz erläutert:

- **Je kälter die Lufttemperatur im Außenbereich der Kirche ist, desto kälter ist es im Innenbereich.**
  Dies hängt vom Wärmespeichervermögen der Baustoffe und der Infiltration der Luft durch undichte Fenster ab.
- **Je geringer die Erwärmungsmöglichkeit des Kircheninnenraums, desto größer ist das Risiko für das Auftreten von Sommerkondensation.**
  Eine Erwärmung ist möglich durch die Ausrichtung der Kirche und den demzufolge ausgerichteten Fensterflächen. Bei Kirchen in Ost-West-Ausrichtung liegen in der Regel die maßgeblichen Fenster in der Südwand.
  Hoher Baumbewuchs in der näheren Umgebung verschattet die Kirchen - die Erwärmung wird verzögert.
- **Je größer die Fensterflächen, desto geringer ist die Häufigkeit von Sommerkondensation zu verzeichnen.**

Große Fensterflächen - insbesondere auf der Südseite der Kirche - sorgen für eine schnelle Erwärmung des Innenraums und damit der Bauteiloberflächen. Die Oberflächentemperatur steigt und der Taupunktabstand wird größer.

- **Je kleiner das Raumvolumen einer Kirche ist, desto häufiger tritt Sommerkondensation auf.**
  Kleinere Kirchen verfügen über einen geringeren Feuchtepuffer durch die Baustoffe und die Einrichtungsgegenstände. Diese sorbieren Feuchtigkeit und geben diese wieder an die Raumluft ab.

Ob die Dicke einer Außenwand und deren Baumaterial Einfluss auf das Auftreten von Sommerkondensation hat, konnte nicht eindeutig im Rahmen dieser Arbeit geklärt werden. Dies liegt darin begründet, dass die genauen baustofflichen Kennwerte fehlen. Hierzu wären zerstörende Untersuchungen durch eine Probeentnahme (Kernbohrung) und eine Untersuchung in einem Baustofflabor notwendig. Insofern besteht hier weiterer Forschungsbedarf, der jedoch nur schwer umzusetzen ist, da diese Art der Analyse den denkmalpflegerischen Belangen entgegensteht.
Mit diesen Forschungsergebnissen wäre es möglich die Wärmespeicherkapazität der Baustoffe festzustellen und die Vermutung, dass diese Einfluss auf die Häufigkeit des Auftretens von Sommerkondensation hat, zu verifizieren.

Das Auftreten von Sommerkondensation hängt wesentlich vom Lüften einer Kirche ab. Dabei ist der "richtige" Lüftungszeitpunkt von Bedeutung. Durch das Bestreben der Kirchenverantwortlichen, an warmen Frühjahrstagen die Kirche durch die Außenluft zu erwärmen, wird feuchte Luft in die Kirche dringen und sich schnell eine Sättigung der Raumluft mit Wasserdampf einstellen. Diese kondensiert an den noch "winterkalten" Bauteiloberflächen. Sommerkondensation tritt auf.
Ein Lüften ist nur dann sinnvoll, wenn die absolute Luftfeuchte außen geringer ist als die Innere. Dies kann durch den Einsatz von Thermo-Hygrometern und dem Ablesen der absoluten Luftfeuchte aus Tabellen bestimmt werden.
Eine Sensibilisierung der Verantwortlichen für die bauphysikalischen Zusammenhänge muss unbedingt im Vorfeld erfolgen, da das "Lüften wollen" und das "Lüften sollen" konträr gesehen wird.
Ein "richtiges Lüften" reduziert das Auftreten von Sommerkondensation.

Eine Vermeidung dieser ist durch ein Beheizen bzw. Temperieren der Kirche möglich. Hierzu stehen verschiedene Heizsysteme zur Verfügung. Bei der Verwendung der in den Kirchen eingebauten Systeme muss geprüft werden, ob diese sinnvoll eingesetzt werden

können. Der Einbau neuer Heizanlagen ist kostenaufwändig und durch die kleinen Kirchengemeinden in der Regel nicht tragbar.
Eine Beheizung vermeidet das Auftreten von Sommerkondensation.

Dem Lüften und Heizen einer Kirche muss eine Abstimmung der einzuhaltenden Raumklimaparameter durch Denkmalpfleger und Restauratoren vorausgehen. Diese bestimmen anhand des Denkmalwertes und den Erhaltungsgrundsätzen für die Raumschale und die Einrichtungsgegenstände die optimale Lufttemperatur und Luftfeuchte.
Ebenso müssen bauliche Maßnahmen in enger Zusammenarbeit dieser Personengruppe abgestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass hohe Nutzerzahlen ebenfalls zu einer Kondensation führten. Die durch die Nutzer entstehende Feuchtigkeit muss während ihres Auftretens abgeführt werden, um Schädigungen zu vermeiden.

Es bleibt festzuhalten, dass das interdisziplinäre Zusammenwirken aller Beteiligten dem Schutz des Baudenkmals förderlich ist. So können Maßnahmen vermieden werden, die das Bauwerk schädigen und einen hohen Verlust von Originalsubstanz zur Folge hätten.

Weitere Forschungsleistungen auf dem Gebiet der Sommerkondensation könnten in der Betrachtung einer "Modellkirche" liegen, bei der über einen längeren Zeitraum Untersuchungen durchgeführt und so weitere Zusammenhänge abgeleitet werden können. Zunächst sollte der Ist-Zustand aufgenommen werden. Das heißt, dass die Verantwortlichen und Nutzer und Verantwortlichen ohne weitere Kenntnis zu diesem Thema die Kirche "nutzen" wie sie es in der Vergangenheit getan haben. Dann sollten sukzessiv Veränderungen des Lüftungs- und Heizverhaltens vorgenommen werden. Parallel zu diesen Phasen müssen - neben den obligatorischen Messungen - baustoffliche Untersuchungen erfolgen und die Auswirkungen der Sommerkondensation auf die Baustoffeigenschaften analysiert werden. Ebenso könnten durch die Betrachtung der Kapillarkondensation weitere Kausalitäten zwischen dem Auftreten von Kondensationserscheinungen und dem Auftreten von feuchteinduzierten Mängeln und Schäden hergestellt werden.
Diese Forschungsergebnisse würden differenzierte und ergänzende Zusammenhänge zum denkmalverträglichen Feuchteschutz bei sommerlicher Kondensation in Kirchen erkennbar machen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Carrier-Diagramm 21
Abb. 3.1: Steighöhe der Feuchtigkeit 32
Abb. 3.2: Ablaufdiagramm zur Feststellung der Art der Feuchteschäden 44
Abb. 5.1: Einflüsse und Abhängigkeiten für das Auftreten von Sommerkondensation .. 51
Abb. 6.1: Selbelang - Relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur 69
Abb. 6.2: Selbelang - Mittelwerte und Standardabweichungen der Lufttemperatur 70
Abb. 6.3: Selbelang - Mittelwerte und Standardabweichungen der relativen Luftfeuchtigkeit 71
Abb. 6.4: Selbelan - Summenhäufigkeit der Lufttemperaturen 72
Abb. 6.5: Selbelang - Summenhäufigkeit der relativen Luftfeuchtigkeiten 72
Abb. 6.6: Selbelang - Summenhäufigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeiten 73
Abb. 6.7: Selbelang - Messpunkt Nord unten 74
Abb. 6.8: Selbelang - Summenhäufigkeit der Oberflächentemperatur und der Taupunkttemperatur 75
Abb. 6.9: Selbelang - Oberflächentemperatur/Taupunkttemperatur 76
Abb. 6.10: Selbelang - Häufigkeit Kondensation - Monate 77
Abb. 6.11: Selbelang - Häufigkeit Kondensation - Prozent 78
Abb. 6.12: Mikrowellen-Feuchtemessung 80
Abb. 6.13: Kapazitive-Feuchtemessung 80
Abb. 6.14: Selbelang - Grenzwerte und Empfehlungen - Messwerte 84
Abb. 7.1: Aufstellung der Kirchen und ihr Verschattungspotential 91
Abb. 7.2: Vergleich der Dicke der Außenmauer und die Entwicklung der Raumlufttemperatur 98
Abb. 7.3: Sorptionsisotherme Staffelde 101
Abb. 7.4: Außenklima - Lufttemperatur 106
Abb. 7.5: Außenklima - relative Luftfeuchte 106
Abb. 7.6: Innenklima - Lufttemperatur 107
Abb. 7.7: Innenklima - relative Luftfeuchte 107
Abb. 7.8: Gutengermendorf - Lüften am 01.05.2005 - Klimavergleich 110
Abb. 7.9: Gutengermendorf - Lüften am 01.05.2005 - Messpunkt Nord unten 111
Abb. 7.10: Potsdam - Beheizung am 23.04. und 24.04.2006 - Temperatur und relative Luftfeuchte 113
Abb. 7.11: Potsdam - Beheizung am 23.04. und 24.04.2006 - Taupunkttemperatur und Oberflächentemperaturen 114

Abb. 7.12: Staffelde - Beheizung am 07.01.2007 - Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur 115
Abb. 7.13: Staffelde - Beheizung am 07.01.2007 - Taupunkttemperatur und Oberflächentemperaturen 116
Abb. 7.14: Fahrland - Gottesdienste am 24.12.2006 - Relative Luftfeuchte und Lufttemperatur 118
Abb. 7.15: Fahrland - Gottesdienste am 24.12.2006 - Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur (Messpunkt Nord unten) 118
Abb. 7.16: Staffelde - Häufigkeit Sommerkondensation 121
Abb. 7.17: Selbelang - Häufigkeit Sommerkondensation 121
Abb. 7.18: Vergleich Innenklima - Raumlufttemperatur 122
Abb. 7.19: Vergleich Innenklima - relative Luftfeuchtigkeit 123
Abb. 7.20: Vergleich Oberflächentemperatur 124
Abb. 7.21: Einflussfaktoren auf das Auftreten von Sommerkondensation 129
Abb. 8.1: Auszug aus DIN EN 15759-1: Beheizungsarten 131
Abb. 8.2: Darstellung der absoluten Luftfeuchtigkeit (erweitertes Carrier-Diagramm) 149
Abb. 8.3: Empfehlung zum Vorgehen bei der Entscheidungsfindung 151
Abb. 8.4: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise bei der Maßnahmenfindung 154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wasserdampfsättigungskonzentration bei Temperaturen von -10 bis 30°C .. 22
Tabelle 2: Taupunkttemperatur der Luft in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte 25
Tabelle 3: Merkmale von Kondensation, aufsteigender und hygroskopischer Feuchte .. 43
Tabelle 4: Auszug aus Tabelle 8 des WTA-Merkblattes 4-5-99/D 79
Tabelle 5:: Übersicht der baulichen Eigenschaften der Kirchen 86
Tabelle 6: Auftreten von Sommerkondensation und Kapillarkondensation während des Messzeitraums 87
Tabelle 7: Rangreihenfolge des Auftretens von Sommerkondensation 88
Tabelle 8: Übersicht der Kirchen - Verschattung und Sommerkondensation 93
Tabelle 9: Übersicht der Kirchen - Bauzeit und Sommerkondensation 94
Tabelle 10: Rangreihenfolge bezogen auf die U-Werte in W/(m²K) 97
Tabelle 11: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation/Mauerdicke 99
Tabelle 12: Baumaterial der Außenmauern - Auftreten von Sommerkondensation 99
Tabelle 13: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation/Fensterfläche 103
Tabelle 14: Rangreihenfolge bezogen auf die Sommerkondensation/Raumvolumen 104
Tabelle 15: Minimale und maximale Abstände der Temperaturdifferenz und der Differenzen der relativen Luftfeuchtigkeit innen und außen 108
Tabelle 16: Lüftungsmöglichkeiten - Auftreten von Sommerkondensation 109
Tabelle 17: Beheizungsmöglichkeiten - Auftreten von Sommerkondensation 112
Tabelle 18: Nutzung - Auftreten von Sommerkondensation 117
Tabelle 19: Salze - Auftreten von Sommerkondensation 119
Tabelle 20: Übersicht über die Einflussfaktoren und die Bedeutung für die Sommer-kondensation 125
Tabelle 21: Übersicht der Heizsysteme und ihre Eignung zur Vermeidung von Sommer-kondensation 137
Tabelle 22: Absolute Luftfeuchtigkeit im Temperaturbereich von -20°C und 30°C 148

Literaturverzeichnis

Ahlborn 2011
Ahlborn: Almemo Handbuch. 9. Auflage. Holzkirchen: Ahlborn - Mess- und Regelungstechnik GmbH, 2011.

Arendt 1993
Claus Arendt: Raumklima in großen historischen Gebäuden. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, 1993.

Arendt 2005
Claus Arendt. Unter welchen Voraussetzungen ist die Beheizung einer Kirche zu bejahen - und wie soll sie durchgeführt werden?. XLII. In: Nationalkomitees, ICOMOS - Hefte des Deutschen (Hg.). Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte - Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes. S. 165-184. München Berlin: Deutscher Kunstverlag 2005.

Arendt 2003
Claus Arendt: Modernisierung alter Häuser. München: Deutsche Verlags-Anstalt, 2003.

Arendt/Seele 2001
Claus Arendt u.a.: Feuchte und Salze in Gebäuden. 2. Auflage. Leinfelden-Echterdingen: Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, 2001.

Arnold 2009
Bärbel Arnold. Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien. 24. In: Landesmuseum, Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches (Hg.). Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums. S. 25-35. Wernersche Verlagsgesellschaft 2009.

Balak/Pech 2008
Michael Balak u.a.: Mauerwerkstrockenlegung - Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung. 2. Auflage. Wien: Springer-Verlag, 2008.

Baureferenten 1972
Diözesan-Baumeister und, Baureferenten. Richtlinien für die Beheizung von Kirchen. In: Das Münster. 1972. S. 257-271.

Bellmer 2010
Jens Bellmer: Das Luftfeuchtebuch - Vom Luftfeuchtevergleich bis zur Kondensationsbewertung in Gebäuden. Detmold: Dirkethilfe Schimmelpilz - Jens Bellmer, 2010.

Bogusch/Duzia 2012
Norbert Bogusch u.a.: Basiswissen Bauphysik - Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012.

Bund Deutscher Orgelbaumeister 2007
Bund Deutscher Orgelbaumeister: Merkblatt zum Heizen und Lüften von Kirchenräumen. Ostheim v. d. Rhön: BDO e.V., 2007.

Burmester 2000
Andreas Burmester. Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und -sanierung: Riskio oder Notwendigkeit? oder Welche Klimawerte sind die richtigen?. In: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Hg.). Raumklima in Museen und historsichen Gebäuden - Kongressband. S. 9-24. Bietigheim-Bissingen: 2000.

Buss 2002
Harald Buss: Das Tabellenhandbuch zum Wärme- und Feuchteschutz. Kissing: WEKA Media GmbH & Co. KG, 2002.

Cammerer 1995
Walter F. Cammerer: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.

Dahm 2010
Christian Dahm: Energieeinsparen in Kirchengemeinden. 2. Auflage. München: oekom verlag, 2010.

Dehio 2000
Georg Dehio: Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler - Brandenburg. München, Berlin: Deutscher Kunstverlag, 2000.

DIN 4108-2:2013-02
DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Februar 2013.

DIN 4108-3:2014-11
DIN 4108-3:2014-11: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. November 2014.

DIN 4108-4:2013-02
DIN 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchtschutztechnische Bemessungswerte. Berlin: Februar 2013.

DIN EN 15026:2007-07
DIN EN 15026:2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007.

DIN EN 15757
DIN EN 15757: Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 1: Leitfäden für die Beheizung von Andachtsstätten. Februar 2012.

DIN EN 15758:2010-12
DIN EN 15758:2010-12: Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren und Geräte zur Messung der Temperatur der Luft und der Oberfläche von Objekten. Dezember 2010.

DIN EN 15759-1:2012-02
DIN EN 15759-1:2012-02: Erhaltung des kulturellen Erbes – Raumklima - Teil 1: Leitfäden für die Beheizung von Andachtsstätten. Februar 2012.

DIN EN ISO 12570:2013-09
DIN EN ISO 12570:2013-09: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur. September 2013.

DIN EN ISO 4618
DIN EN ISO 4618: Beschichtungsstoffe - Begriffe. Januar 2015.

DIN EN ISO 8044:1999-11
DIN EN ISO 8044:1999-11: Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen. November 1999.

E DIN EN 15759-2:2016-02
E DIN EN 15759-2:2016-02: Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 2: Lüftung für den Schutz von gebäuden und Sammlungen des kulturellen Erbes. Februar 2016.

Erhardt/Mecklenburg 1994
David Erhardt u.a.: Relative Humidity Re-Examined in: Preventive Conservation, Practice, Theory and Research. Preprint of the Contibution to the Ottawa Congress, 12-16. September 1994, 1994.

Fischer-Hoyer/Weiß 2006
Michael, Fischer-Hoyer u.a.: Denkmalgerechtes Raumklima - Bamberger Dom: Nachhaltige Sanierung der Lüftungsanlage. In: IKZ-Fachplaner. 2006. Heft 4 Seiten 25-27.

Frank/Schuhmann 1998
L. Frank u.a.: Schadensatlas. Klassifikation und Analyse von Schäden an Ziegelmauerwerk. Schutz und Erhalt des europäischen Kulturerbes. Forschungsbericht Nr. 8. Band 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1998.

Frössel 2011
Frank Frössel: Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung - Wenn das Haus nasse Füße hat. Werder (Havel) und Stuttgart: Baulino Verlag und Fraunhofer IRB Verlag, 2011.

Garrecht 2005
Harald Garrecht . Raumklimatische Untersuchungen und bauphysikalische Konzepte. Forschungsergebnisse zur Klimaproblematik im Kloster Maulbronn und im Dom zu Speyer. In: Nationalkomitees, ICOMOS - Hefte des Deutschen (Hg.). Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte - Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pfelge des Weltkulturerbes. S. 9-18. München Berlin: Deutscher Kunstverlag 2005.

Garrecht u.a. 2015
Harald, Garrecht u.a.: DBU-Forschungsprojekt - Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege. 2015. Jg. 6, Heft 3 46-52.

Goecke-Seischab/Harz 2011
Margarete Luise Goecke-Seischab u.a.: Der Kirchenatlas. München: Kösel-Verlag, 2011.

Goretzki 2012
Lothar Goretzki. Salze im Mauerwerk. In: Geburtig, Gerd u.a. (Hg.). Messtechnik - Der Weisheit letzer Schluss?. S, 98-104. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2012.

Graupner 2001
Klaus Graupner. Zur Heizung und Lüftung historischer Gebäude aus bauklimatischer Sicht. In: Das moderne Museum: Vorträge zur MUTEC 1999. S. 69-89. München: Verlag Sr. C. Müller-Straten 2001.

Großeschmidt 2012
Henning Großeschmidt. Energieeinsparung in Massivbauweise. In: Initiative Denkmalschutz (Hg.). Denkma[i]l Nr. 11 - Temperierung und Energieeffizienz. S. 11-19. Wien: 2012.

Hohmann u.a. 2004
Rainer Hohmann u.a.: Bauphysikalische Formeln und Tabellen. Wärmeschutz - Feuchteschutz - Schallschutz. 4. Auflage. München, Unterschleißheim: Werner Verlag, 2004.

Keylwerth 1969
Rudolf Keylwerth. Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchte-Gleichgewicht. 27. Jahrgang, Heft 8. In: HOLZ als Rohstoff und Werkstoff. S. 285-290. Karlsruhe: Bruder-Verlag 1969.

Kitschke/Grell 1994
Andreas Kitschke u.a.: Potsdam - Pfingstkirche. Peda-Kunstführer Nr. 141/1994. Passau: Ev. Kirchengemeinde Potsdam (Hrsg.), 1994.

Kohlstock 2011
Peter Kohlstock: Topografie: Methoden und Modelle der Landesaufnahme. Berlin/New York: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2011.

Krischer/Kast 1978
Otto Krischer u.a.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.

Künzel 2007
Helmut Künzel: Bauphysik und Denkmalpflege. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007.

Künzel 2015
Helmut Künzel: Außenputze - früher und heute. Wissenschaftliche Erkenntnisse, Praxis und Normung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015.

Künzel 2009
Helmut Künzel: Bauphysik und Denkmalpflege. 2. erweiterte Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

Künzel 2002
Helmut Künzel: Bauphysik - Geschichte und Geschichten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002.

Lorenz u.a. 2005
Wolfgang Lorenz u.a.: Sanierung von Feuchte- und Schimmelpilzschäden. Diagnose, Planung und Ausführung. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2005.

Löther 2005
Thomas Löther: Untersuchungen zur Temperierung historischer Gebäude. München: GRIN - Verlag für akademische Texte, 2005.

Maier 2012
Josef Maier: Handbuch Historisches Mauerwerk - Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren. 2. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.

Neroth/Vollenschaar. 2011
Günter Neroth u.a.: Wendehorst Baustoffkunde. Grundbegriffe - Baustoffe - Oberflächenschutz. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

Patitz 2012
Gabriele Patitz. Mauerwerk und Beton mit Radar und Ultraschall zerstörungsfrei erkunden. In: Geburtig, Gerd u.a. (Hg.). Messtechnik - Der Weisheit letzter Schluss?. S. 83-97. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2012.

Pech u.a. 2005
Anton Pech u.a.: Baukonstruktionen - Band 11: Fenster. Wien: Springer-Verlag, 2005.

Pfeil 1975
Axel Pfeil: Kirchenheizung und Denkmalschutz - Wärmebedarf Feuchtehaushalt Heizungssysteme. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag, 1975.

Roloff u.a. 2009
Jürgen Roloff u.a.. Erhalt temporär genutzter Gebäude. In: Djahanschah, u.a. (Hg.). S. 15-32. Berlin: Erich Schmidt Verlag 2009.

Schellen 2002
Henricus Schellen: Heating Monumental Churches. Indoor Climate and Preservation of Clutural Heritage. Eindhoven: Technische Univerität. Dissertation, 2002.

Schild/Willems 2011
Kai Schild u.a.: Wärmeschutz - Grundlagen Berechnung Bewertung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

Schramek (Hrsg.) 2011
Ernst-Rudolf Schramek (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 75. Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2011.

Schrimpf 2005
Petra Schrimpf: Sommerkondensation in historischer Bausubtanz - Untersuchungen in der Dorfkriche Birkholz. Berlin: Masterarbeit an der TU Berlin, 2005.

Schwarz/Metzger 2003
Ulrike Schwarz u.a.: Denkmaltopograhie Bundesrepublik Deutschland, Denkmale in Brandenburg. Landkreis Ostprignitz-Ruppin. Teil 2: Gemeinde Fehrbellin, Amt Lindow (Mark) und Stadt Rheinsberg. Band 13.2. Worms am Rhein: Wernersche Verlagsgesellschaft, 2003.

Troi 2010
Alexandra Troi: Kirchenheizung - Eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege. TU München: Dissertation, 2010.

Tschegg u.a. 1984
Elmar Tschegg u.a.: Grundzüge der Bauphysik - Akustik, Wärmelehre, Feuchtigkeit. Wien, New-York: Springer, 1984.

VDI 3817
VDI 3817: Technische Gebäudeausrichtung in Baudenkmalen und denkmalwerten Gebäuden. Februar 2010.

Weber/Hecht 2016
Jürgen Weber u.a.: Bauphysikalische und chemische Grundlagen - Kapitel 3. 4. Auflage. In: Weber, Jürgen u.a. (Hg.). Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung - Verfahren und juristische Betrachtungsweise. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016.

Willems u.a. 2006
Wolfgang M. Willems u.a.: Vieweg Handbuch Bauphysik - Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Wiesebaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006.

WTA 4-5-99:2015-10

WTA 4-5-99:2015-10: WTA-Merkblatt 4-5-99/D - Beurteilung von Mauerwerk - Mauerwerksdiagnostik. München: Oktober 2015.

WTA 6-12-11/D:2011-07

WTA 6-12-11/D:2011-07: WTA-Merkblatt 6-12-11/D - Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken. Juli 2011.

Anlage - Erfassungsbogen

ALLGEMEINES

Kirche	Ort		
Ansprechpartner	Name		
	Straße		
	Ort		
	Telefon		
Denkmalpfleger	Name		
	Anschrift		
	Telefon		
Baujahr		**Umbau(ten)**	
Kubatur	m³		
Ausrichtung	☐ Ost-West		☐ Nord-Süd
Nutzung		**Häufigkeit**	
Winterkirche	☐ vorhanden		☐ nicht vorhanden
Beheizung	Welche		
	☐ vorhanden		☐ nicht vorhanden
	☐ funktionsfähig		☐ defekt
	☐ regelbar		☐ nicht regelbar
Belüftungsmögl.	☐ Tür(en)		☐ Fenster
Beschreibung	☐vorhanden		☐ nicht vorhanden
	☐Dehio		
	☐ Sonstige		
Archive	☐ Bauordnungsamt		☐ Stadt-/Kreisarchiv
	☐ BLDAM		☐ Landeshauptarchiv
	☐ Sonstige		
Untersuchungen	☐ ja		☐ nein
	☐ Restauratorische Untersuchungen		☐ Grabungen
	☐ Sonstige		
Fotos	Außen	☐ ausreichend	☐ noch erstellen
	Innen	☐ ausreichend	☐ noch erstellen
	Schäden	☐ ausreichend	☐ noch erstellen
Pläne	Grundriss	☐ vorhanden	☐ noch erstellen
	Schnitt(e)	☐ vorhanden	☐ noch erstellen
	Ansichten	☐ vorhanden	☐ noch erstellen
	Bewuchs	☐ vorhanden	☐ noch erstellen

AUSSENBEREICH

Außenanlagen	Bewuchs		
	Geländeneigung		
	Drainage	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
	Spritzschutz Sockel	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
		Material	
Dach	Eindeckung		
		☐ intakt	☐ schadhaft
	Regenrinne/Fallrohre	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
		☐ intakt	☐ schadhaft
Außenwände/	☐ Feldstein		☐ Backstein
Sockel	☐ verputzt		☐ steinsichtig
(A) Außenwand	☐ Risse		☐ intakt
(S) Sockel	☐ Fugenmörtel defekt		☐ Steine verwittert
	☐ Putzabplatzungen		☐ Anstrichschäden
	☐ Salzausblühungen/Krusten		☐ Feuchteschäden
	☐ biogener Befall		☐ Verfärbungen
	☐ Sonstiges		
Gesimse/Glieder-	Welche		
ungselemente	☐ schadhaft durch Risse		☐ intakt
	☐ Fugenmörtel defekt		☐ Steine verwittert
	☐ Putzabplatzungen		☐ Anstrichschäden
	☐ Salzausblühungen/Krusten		☐ Feuchteschäden
	☐ biogener Befall		☐ Verfärbungen
	☐ Sonstiges		
Tür(en)	Material		
		☐ intakt	☐ schadhaft
	Abdichtung (funktionsfähig)	☐ ja	☐ nein
Fenster	Verglasung		
	Ausrichtung/Fläche	☐ Nord	m²
		☐ Süd	m²
		☐ West	m²
		☐ Ost	m²
	Abdichtung (funktionsfähig)	☐ ja	☐ nein

INNENBEREICH

Dachraum	begehbar	☐ ja	☐ nein
	Verbindung (Kirchenraum)	☐ ja	☐ nein
	Fußboden		
		☐ intakt	☐ schadhaft
	Schäden Dachraum	☐ Feuchte	☐ Pilzbefall
		☐ Holzschädlinge	☐ Schwammbefall
Wände	Oberfläche/Material		
	☐ schadhaft durch Risse		☐ intakt
	☐ Putzabplatzungen		☐ Anstrichschäden
	☐ Salzausblühungen/Krusten		☐ Feuchteschäden
	☐ Ablaufspuren Fenster		☐ Verfärbungen
	☐ Sonstiges		
Decke	Oberfläche/Material		
	☐ schadhaft durch Risse		☐ intakt
	☐ Putzabplatzungen		☐ Anstrichschäden
	☐ Salzausblühungen/Krusten		☐ Feuchteschäden
	☐ Verfärbungen		
	☐ Sonstiges		
Fußboden	Oberfläche/Material		
	☐ schadhaft durch Risse		☐ intakt
	Sonstiges		
Fenster	Kondenswasserrinne	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
	Lüftungsflügel	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
		Anzahl	
Wand-/Decken-	☐ vorhanden		☐ nicht vorhanden
fassungen	☐ intakt		☐ Risse
(W) Wand	☐ Verfärbungen		☐ Abplatzungen
(D) Decke	☐ Verschmutzung		

EINBAUTEN

Inventar	Gestühl	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
	Kanzel	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
	Orgel	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
	Wandverkleidungen	☐ vorhanden	☐ nicht vorhanden
		Welche	
	Sonstiges		
Bauteile aus Holz	☐ intakt		☐ lose Bauteile
	☐ Verleimungen schadhaft		☐ Risse
	☐ Holzschädlinge		☐ Verfärbungen
	☐ Farbschichten abgeplatzt		☐ Blasenbildung
	☐ Verschmutzung		☐ Vergrauung
	Sonstiges		
Bauteile aus Stein	☐ intakt		☐ Risse
	☐ Ausbrüche/Abplatzungen		☐ Verfärbungen
	☐ lose Bauteile		☐ Verschmutzung
	☐ Absanden		☐ Vergrauung
	☐ Beläge		☐ Feuchteschäden
	Sonstiges		
Bauteile aus Metall	Welche		
	☐ Anstrich		☐ Blasenbildung
	☐ Rostbildung/Korrosion		☐ lose Bauteile
	☐ Farbveränderungen		
Weitere Bauteile			
Raumklima	☐ muffiger Geruch		☐ Schimmel
	☐ Wasserablaufspuren (Fenster)		☐ biogener Befall
	☐ Schwitzwasser auf kalten Bauteiloberflächen		
	max. Luftfeuchtigkeit	%	
	min. Luftfeuchtigkeit	%	
	⦸ Luftfeuchtigkeit	%	
	max. Lufttemperatur	°C	
	min. Lufttemperatur	°C	
	⦸ Luftfeuchtigkeit	°C	