

Analyse der Feuchte in der Kirche Breitfurt Messungen und Berechnungen

Studie

von Klaus Reifarth,

Energiebeauftragter der Prot. Kirchengemeinde Breitfurt, 66440 Blieskastel

(ausgeführt mit Klimamessungen in der Kirche über ein Jahr)



Foto: Tatjana Falk-Reifarth

Kurzfassung

Hohe Luftfeuchtigkeit in der Prot. Kirche Breitfurt hat zu Schimmel und Korrosionsschäden an Drahtzügen in der Orgel geführt. Die Kirche ist nicht beheizt, außer bei Gottesdiensten und Konzerten. Lüften durch Klappfenster hat über Jahre nicht die Feuchte gesenkt. Um die Ursache zu ermitteln und um Abhilfe zu schaffen, ist ein Messprogramm entwickelt, sind Messgeräte ausgesucht und Messungen über ein Jahr von Februar 2022 bis März 2023 durchgeführt. Gemessen wurden die Luftfeuchte und Luft-Temperatur außen im Turm und an vier Stellen im Kirchenraum mit Dataloggern, die Feuchte von Holz des Parkettbodens und der Bänke sowie die Luftgeschwindigkeit in geöffneten Klappfenstern. (Messprogramm ab Seite 8)

Die jahreszeitliche Änderung der relativen Feuchte in der Kirche bewegt sich zwischen etwa 65% in den warmen Monaten und knapp unter 90% in den Winter-Monaten. Viele Tage im Jahr sind Temperatur und Luftfeuchte im Bereich der Schimmelbildung und des Wachstums von Schimmel (Streudiagramm 2022, Seite 11).

Die Luftgeschwindigkeit in geöffneten Klappfenstern wurde über mehrere Minuten gemessen und mit der 10-minütigen Windgeschwindigkeit der benachbarten Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes DWD in einer einfachen empirischen Beziehung korreliert (Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster, Seite 31).

Die Messungen der Luftfeuchte und Temperatur mit 15-minütiger Auflösung wurden in die Dichte von Wasserdampf umgerechnet und das Gefälle der Dampfdichte zwischen Innenraum und Umgebung ermittelt. Protokolliert sind die Uhrzeiten des Öffnens und Schließens der Fenster. Die Luftgeschwindigkeit und der Luft-Volumenstrom durch die Fenster wurden aus Daten der Windgeschwindigkeit des DWD und den Öffnungszeiten der Fenster berechnet. Mit dem Gefälle der Dampfdichte ergibt sich der ausgetauschte Massenstrom der Luftfeuchte über das freie Lüften durch die Fenster. In der warmen Jahreszeit betragen die monatlichen Maxima des Massenstroms 29 g/h Wasserdampf im Juni und August. In den kalten Monaten ist der ausgetauschte Massenstrom der Feuchte durch manuelle Lüftung praktisch nicht vorhanden (Manuelle Fensterlüftung, usw., ab Seite 36 bis 43).

Da die Luftfeuchte in der Kirche in den kalten Monaten wesentlich über der Zielmarke von 65% erhöht ist, lässt sich der ausgetauschte Massenstrom der Feuchte im Sommer als notwendiger Lüftungsbedarf auffassen (Seite 40).

Mit derselben Methode sind stundengenau die Massenströme der Feuchte berechnet, die eine **automatische** Lüftung durch **freie** Konvektion in den Fenstern in den kalten Monaten erreicht hätte. Als Bedingungen sind gewählt, dass das Gefälle der Dampfdichte die Messtoleranz überschreitet und die Außentemperatur wegen Frostgefahr im Kirchenraum 3°C nicht unterschreitet. Die Simulation zeigt, dass der monatlich gemittelte Massenstrom von 9 g/h bis 19 g/h in kalten Monaten den sommerlichen Wert nicht erreicht und eine höhere Feuchtigkeit in der Kirche zur Folge hat (Seite 39 - 40).

Eine **Bilanz der Feuchte** über das Kirchengebäude ist mit den Mengenströmen Zustrom und Abstrom aufgestellt. Der Zustrom aus dem erdberührten Fußboden mittels Diffusion wird analog zu der bauphysikalisch begründeten Norm DIN 4108-3 Klimabedingter Feuchteschutz über Messwerte am Parkettboden abgeschätzt. Auch der Eintrag von Feuchte von Besuchern geht in die Bilanz ein. Die Simulation berücksichtigt Konvektion

durch Baufugen in den Fenstern und eine automatische Lüftung mit den Klappfenstern unter den genannten Bedingungen. Der Vergleich der stundengenau aufgestellten Bilanz für eine sommerliche und winterliche Periode weniger Monate weist ein erhebliches Defizit für die kalten Monate auf. Die gewünschte Einstellung der relativen Feuchte im Kirchenraum durch eine automatische Lüftung mit freier Konvektion ist in den Wintermonaten nicht möglich (Bilanz der Feuchte der Kirche, Seite 47).

Die Messungen in der Kirche Breitfurt und die Berechnungen „Bilanzierung – Feuchte-Austrag“ zeigen, dass eine automatische Fenster-Lüftung die relative Feuchte in der Kirche nicht dauerhaft – insbesondere in den kalten Monaten – in einen Bereich außerhalb der Bildung und des Wachstums von Schimmel versetzen kann (Feuchte-Austrag bei manueller Lüftung, Seite 55 – 57).

Dies mag der baulichen Gegebenheit besonders hoher Feuchtigkeit im Fußboden und den Außenmauern geschuldet sein. Die Kirche hatte an den Außenmauern Schäden durch abblätternden Putz aufgrund hoher Feuchtigkeit im Mauerwerk. In 1999 wurde der Putz innen und außen bis zu einer Höhe von 1,1 m abgeschlagen (Anlage, Seite 93). In mehreren Lagen wurden Sanierputze aufgebracht, die zum einen Wasserdampf leichter nach außen diffundieren lassen und andererseits genügend Hohlräume haben, um die mit aufsteigender Feuchte transportierten Salze unschädlich für den Aufbau speichern zu können.

Als technische Lösungen wurden in Betracht gezogen:

1. automatische Lüftung mit Abluftventilator und gesteuerten Klappfenstern bei einer ständigen, geringen Beheizung der Kirche (Seite 58)
2. ständige Beheizung auf eine Grundtemperatur mit weiterhin manueller Lüftung
3. automatische Lüftung mit Abluftanlage, jedoch ohne zusätzliche Beheizung (Seite 62)

Zu 1

Eine Simulations-Rechnung für einige Winter-Monate ist stundengenau erstellt und berücksichtigt Wärmeverluste aus Transmission. Die Temperatur des Kirchenraums folgt der Außentemperatur, jedoch sei sie durch die Heizung um 1 K gegenüber den Messungen erhöht. Die Konvektion wird durch automatisch angesteuerte Fenster für den Zustrom und einen Ventilator für den Abstrom erzwungen.

Die Analyse zeigt, dass der Feuchte-Austrag während aller kalten Monate sicher gestellt ist, so dass sich eine relative Feuchte deutlich unter dem Bereich der Schimmelbildung einstellen wird. Nachteilig ist der erhöhte Wärmebedarf.

Zu 2

Eine ständige Beheizung auf eine Grundtemperatur und ein häufiges, manuelles Lüften könnte ebenso die relative Feuchte ganzjährig in den gewünschten Bereich senken und halten.

Nachteilig ist der erheblich höhere Heizenergie-Bedarf im Vergleich mit der Lösung mit geringer Beheizung. Zudem bringt die Grundtemperatur keinen weiteren Nutzen. Es sei denn, dass sich Gemälde, Decken-Fresken oder sonstige empfindliche Kunstwerke in dem Raum befinden, die unter Änderungen des Raumklimas leiden.
Siehe Kilian, R. (2013): Klimastabilität historischer Räume.

Zu 3

Die automatische Lüftung mit einer Abluftanlage erfüllt die Senkung der Raumluft-Feuchte ohne Einschränkung.

Der Feuchte-Austrag ist während aller kalten Monate sicher gestellt, so dass sich eine relative Feuchte deutlich unter dem Bereich der Schimmelbildung einstellt und erhalten bleibt.

Die automatische Lüftung mit einer Abluftanlage hat zudem den geringsten Energie-Bedarf. Der Wärmebedarf wird nicht verändert und der Verbrauch an elektrischen Energie ist aufgrund geringer stundenweiser Laufzeit des Ventilators sehr gering.

Daher ist eine Abluftanlage auch aus Gründen des Klimaschutzes die bessere Lösung.

Die Investition liegt allerdings bei etwa 10.000 €. Über die technische Lebensdauer der Anlage gesehen, ergeben sich jährliche Fixkosten durch die Abschreibung in der Größenordnung von 500 €. Dies ist deutlich weniger als weiterhin eine Kirche auf Grundtemperatur zu halten. Eine Umstellung von Heizen auf Grundtemperatur auf eine bedarfs-orientierte Beheizung sollte erwogen werden.

Konkrete Empfehlungen

Konkret führt die vorliegende Analyse zu diesen Empfehlungen

- Ab April bis September/Okttober verringert Lüften die Feuchtigkeit in der Kirche effizient. Es kann manuell und dauerhaft gelüftet werden.
- Auch in den kalten Monaten kann eine kontrollierte, automatische Lüftung einen signifikanten Beitrag zum Feuchte-Austrag leisten. Jedoch sollte ab spätestens Oktober kontrolliert nach Feuchte und Temperatur des Innenraums und der Außenluft gelüftet werden, da bei im Winter häufigen, feucht-kalten Wetterbedingungen durch unkontrolliertes Lüften mehr Feuchtigkeit in der Innenraum getragen werden würde.
- Bei „unbeheizten“ Kirchen, die von der Konstruktion her feucht sind, ist nicht davon auszugehen, dass eine nach Feuchte und Temperatur geregelte automatische Lüftung mit freier Konvektion durch gesteuerte Fenster ausreichend Feuchtigkeit im Winterhalbjahr ausbringt. Erforderlich ist eine entsprechend gesteuerte Abluftanlage, die den Volumenstrom durch die Fenster kräftig erhöht.
- Die Raumtemperatur mit dem Ziel des Feuchteaustrags könnte dauernd geringfügig erhöht werden. Damit würde die Raumtemperatur wie in der unbeheizten Kirche weiter der Außentemperatur folgen, aber durch eine geringe konstante Heizleistung ein etwas erhöhtes Niveau einnehmen. Wenn die Raumtemperatur nicht an einer konstanten Grundtemperatur ausgerichtet wird, verringert dies den Wärmebedarf erheblich.
- Die optimale Lösung des Feuchte-Problems in der „unbeheizten“ Kirche Breitfurt ist eine automatisch gesteuerte Abluftanlage.
- Eine Umstellung von bedarfs-orientiertem Heizen auf Einhalten einer Grundtemperatur ist die ökonomisch schlechteste Lösung. Umgekehrt ist die Umstellung von Einhalten einer Grundtemperatur auf bedarfs-orientiertes Heizen und Einbau einer Abluftanlage die günstigere Lösung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Aufgabenstellung zur Untersuchung der hohen Luftfeuchte.....	7
Messprogramm zur Bauphysik historischer Gebäude.....	8
Streudiagramm der Luftfeuchte in der Kirche Breitfurt 2017.....	11
Messgeräte – Datalogger, Materialfeuchte, Anemometer.....	14
Datalogger.....	14
Aufbereitung der Messdaten der Datalogger.....	15
Anemometer.....	15
Messung der Feuchtigkeit in den Baustoffen.....	16
Messung im Fußboden.....	17
Messung im Putz der Seitenwand, in kleiner Distanz über Fußboden	18
Sanierung des Putzes in 1999.....	18
Mess-Ergebnisse	19
Tagesgang der Temperatur über wenige Tage	19
Temperatur-Differenzen – repräsentative Saaltemperatur.....	20
Temperaturen im Winter und Sommer.....	21
Verlauf der Feuchte und Tagesschwankung.....	23
Absolute Feuchte und Potential gesteuerter Lüftung.....	25
Zusammenhang der Feuchte mit Regen.....	26
Tagesmittelwerte aus Messwerten	27
Feuchtegehalt der Baustoffe.....	29
Lüftungs-Strom und Wind	30
Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster	31
Volumenstrom der Lüftung	36
Manuelle Fensterlüftung	36
Automatische Fensterlüftung	39
Fugenlüftung.....	44
Abmessungen der Fenster und des Saals.....	45
Bilanz der Feuchte der Kirche	47
Personen als Quelle der Feuchtigkeit.....	47
Fußboden als Quelle der Feuchtigkeit.....	48
Meßwerte am Boden.....	49
Berechnung Stoffdurchgang Massenstrom.....	51
Berechnung Stoffübergang Massenstrom.....	53
Stoffübergangskoeffizient β der Grenzschicht [Brauer].....	53
Bilanzierung – Feuchte-Austrag bei manueller Lüftung	55
Bilanzierung – Feuchte-Austrag bei automatischer Fenster-Lüftung	56
Technische Lösung: Beheizung der Kirche.....	58
Technische Lösung: Abluftanlage in unbeheizter Kirche.....	62
Beispiel Heizbetrieb der Kirche und Feuchte	65
Literaturverzeichnis.....	66
Anhang	67
Modelle des Stofftransports.....	67
Umrechnung Feuchte von Wasserdampf in Dampfdichte.....	68
Stoffübergang von Wasserdampf bei freier Konvektion	69

Berechnungsmethode zum Wassertransport durch Konvektion	71
Lüftung durch Fugen.....	72
Differenzdruck des Windes über das Kirchengebäude.....	75
Wetter-Daten des DWD.....	76
Umrechnung von Stationsdaten auf örtliche Windgeschwindigkeit	77
Fensterlüftung.....	81
Lüftungsanlagen.....	83
Physikalische Modelle zum Wassertransport in Bauteilen.....	84
Ausgleichsfeuchte und Sorptionsisotherme.....	86
Dynamisches Feuchtespeichervermögen (Nordtest-Verfahren).....	88
Berechnungsmethoden zum Wassertransport durch Diffusion	89
Diffusionskoeffizient und Feuchtegehalt.....	92
Beschreibungen zur Bausubstanz.....	93
Sanierung des Putzes in 1999.....	93
Dach und Fußboden.....	93
Schimmelpilz	95
Blockade der Orgel in Breitfurt.....	98
Umbau der elektrischen Heizung.....	98

Aufgabenstellung zur Untersuchung der hohen Luftfeuchte

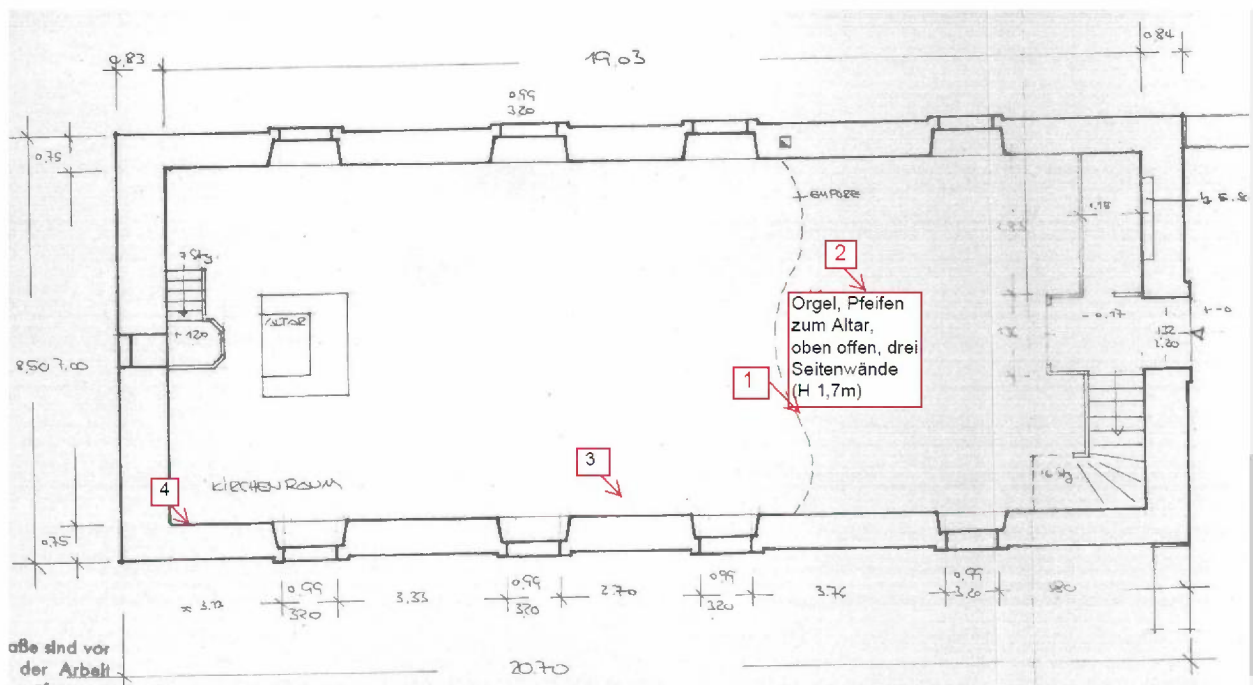
Die Prot. Kirche Breitfurt weist ein Problem mit Schimmel und Korrosion an der Orgel aufgrund ganzjährig hoher Raumlufffeuchte auf. Die Raumlufffeuchte schwankt in Teilen des Jahres im Bereich der Schimmelbildung und des Schimmelwachstums. Aber wegen niedriger Temperaturen im Raum während der kalten Jahreszeiten bleibt das Wachstum von Schimmel dennoch gering.

Das Messprogramm soll diese Fragen beantworten:

Wie viel Gramm Wasser pro Stunde werden von innen nach außen transportiert? Und umgekehrt, wie viel kommt aus dem Boden und den Fundamenten? Wann wird viel nach außen getragen, wie lange im Monat?

Da jahrelange Messungen des Feuchte-Verlaufs in der Kirche eine verlässliche Lösung nicht nahegelegt haben, ist folgendes Messprogramm aufgestellt. Dabei sind vor allem Anregungen von Herrn Uwe Lackner, LKR Bauabteilung, und dem Presbyterium Breitfurt aufgenommen.

Grundriss der Kirche mit Messstellen für Feuchtigkeit und Temperatur



Orientierende Messungen einiger Jahre zeigen genauer das Problem.
Siehe Kapitel [Streudiagramm der Luftfeuchte in der Kirche Breitfurt 2017](#)

Messprogramm zur Bauphysik historischer Gebäude

[Kilian 2013] untersucht den Jahresverlauf der hygrothermischen Zustände in drei historischen Gebäuden, die weder beheizt noch klimatisiert sind. Die Lüftung dieser Gebäude wird nach Gutdünken gelegentlich vorgenommen. Diese Gebäude enthalten künstlerische Objekte, wie Malerei auf Holz, Leinwand und Tapete, die auf Feuchteschwankungen empfindlicher als die Bauwerke aus Ziegelstein oder in Holz-Konstruktion reagieren.

Auch die Kirche in Breitfurt ist weitestgehend nicht beheizt und wird sporadisch durch Öffnen von zwei sich gegenüber liegenden Klappfenstern gelüftet. Nur zu Gottesdiensten wird die Kirche Breitfurt hauptsächlich während des vierten Quartals kurz beheizt. Die elektrische Heizung ist dabei nur wenige Stunden zu einer Veranstaltung eingeschaltet. Insgesamt wird an weniger als zehn Tagen im Jahr geheizt. Die Orgel in der Kirche verträgt keine schnelle Aufheizung des Raumes.

Um die Problemlage der historischen Gebäude zu charakterisieren, wertet [Kilian 2013] die Messungen von relativer Luftfeuchte und Raumtemperatur in Streudiagrammen aus. Messungen der Klimaparameter im Gebäude über ein Jahr mit Dataloggern dienen als Grundlage.

Streudiagramme nach [Kilian 2013] zeigen die Tagesmittelwerte der Feuchte über der Temperatur auf. Diese Punktwolken zeigen Häufigkeiten der raum-klimatischen Zustände an. Hinsichtlich möglicher Schäden an Kunstobjekten oder der Bausubstanz werden im Streudiagramm ungünstige oder potentiell schädliche Bereiche ausgewiesen: Frost, Trockenheit und Bereich der Mikrobiologie bei hoher Luftfeuchte.

Bedenkliche Trockenheit ist nach [Kilian 2013, Seite 103] die relative Feuchte unter 40%. Auch die Bildung von Schimmel und das Wachstum von Schimmelpilzen sind zu vermeidende Klimabereiche hoher Feuchte, die nach Substratklassen eingeteilt sind. Die Schadensgrenzwerte in den Streudiagrammen sind mit den Wertepaaren der Feuchte und Temperatur ablesbar:

Bereich der relativen Feuchte	Temperatur
90% .. 100%	0°C
... bis 83%	10°C
72% bis 81%	15°C
71% bis 80%	20°C

Ergänzend zeigen Histogramme die Häufigkeit von Klassen der Feuchte bzw. der Temperatur über alle Stunden-Messwerte eines Messjahres an.

[Kilian 2013] wertet die Messungen hinsichtlich der täglichen Schwankungsbreite der relativen Luftfeuchte aus. Die Schwankungsbreite ist offensichtlich die Differenz von Tagesmaximum und Tagesminimum der Feuchte. Zur Bestimmung der Häufigkeiten der täglichen Schwankungsbreite setzt [Kilian 2013] eine Klassenbreite von 1% relative Feuchte fest.

In einem Beispiel [Kilian 2013, Seite 117] sind die täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte die meiste Zeit unter 15% r.F. und mit dem guten Erhaltungszustand der

Malerei wird die These unterstützt, *dass Änderungen in diesem Bereich weitestgehend unkritisch für gefasste Holzoberflächen sind.*

[Kilian 2013, Seite 29] erklärt Einflüsse der Änderung der Luftfeuchtigkeit auf die Schädigung von Gemälden und Holz-Objekten:

Zahlreiche Schäden an Kunstwerken können, einmal abgesehen von menschlicher Einwirkung, auf klimatische Einflüsse zurückgeführt werden.

Geringe relative Luftfeuchte führt dazu, dass Materialien schrumpfen und verspröden, eine hohe relative Luftfeuchte zur Aufnahme von Wasser und damit zu einem Quellen und letztendlich zu irreversiblen, plastischen Deformationen.

Auch Holz kann auf diese Weise bei hoher Feuchte strukturell geschädigt werden. Dieses Verhalten ist insbesondere im Materialverbund als kritisch zu betrachten, denn die meisten Kunstwerke sind inhomogen und vereinen die verschiedensten Materialien in sich. Bei Tafelgemälden beispielsweise haben die tragende Holztafel, der Kreidegrund und die Malschichten unterschiedliche thermische und hygrische Dehnungskoeffizienten. Dies verstärkt auftretende Spannungen und das damit verbundene Schädigungspotential. Holz hat zudem in Abhängigkeit der Schnittrichtung unterschiedliche Eigenschaften. Bei einer Erhöhung der Feuchte dehnt sich das Holz kaum in Faserrichtung, der Kreidegrund jedoch schon. Dadurch dass die Dehnung aber durch das Trägermaterial Holz in eine Richtung gehindert (restrained) ist, entstehen Spannungen im Materialverbund.

Hohe relative Luftfeuchte führt gleichzeitig zu einem Festigkeitsverlust bei organischen Bindemitteln, wie beispielsweise leimgebundener Kreidegrund bei Tafelgemälden oder Vergoldung. Leinwandgemälde entwickeln bei hoher Feuchte Spannungen im textilen Trägermaterial. Trocknen diese bei hoher Feuchte plastisch verformten Materialien wieder aus, so entstehen Risse. Bei wiederholten Wechseln zwischen beiden Zuständen entstehen also Spannungen, die zur Schädigung und zur fortschreitenden Zerstörung von Kunstwerken führen.

Die Konsequenz daraus ist, dass zur Schadensvermeidung Schwankungen von Feuchte und Temperatur minimiert werden müssen. Für die dauerhafte Erhaltung von historischem Kulturgut ist es also notwendig, das Klima möglichst konstant zu halten.

Interessant ist der berichtete Zusammenhang von Wärmedehnung und relativer Feuchte. Einen weiteren Zusammenhang mit der relativen Feuchte gibt es bei der Sorption – also der Aufnahme von Wasserdampf in dem Werkstoff, der mit Sorptionsisothermen als Wassergehalt über der relativen Feuchte für einige Materialien bekannt ist. Eine Sorptionsisotherme für Holz zeigt einen sehr geringen Einfluss der Temperatur, der praktisch vernachlässigbar erscheint.

Demnach sollte die Änderung der relativen Luftfeuchte im Tagesgang nicht zu hoch sein, wenn es sich um Holz handelt, wie bei der Orgel in der Kirche Breitfurt.

[Kilian 2013, Seite 36] gibt Empfehlungen der Denkmalpflege aus Bayern wieder:

Die Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege [Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2002: Vorsorge, Wartung und Pflege] nennen als optimales Raumklima einen Zielbereich für die relative Luftfeuchte zwischen 50-65 % r.F. mit möglichst hoher Konstanz. Die geforderte Mindestluftfeuchte von 50 % r.F. ist ein Grenzwert, der sich von negativen Erfahrungen mit der Beheizung von Kirchen und historischer Gebäude herleitet. Zu hohe Feuchte soll vor allem wegen des Risikos

mikrobiologischen Wachstums vermieden werden.

Die Temperierung oder Beheizung soll grundsätzlich nur zurückhaltend und wo notwendig im Hinblick auf Komfort und Konservierung erfolgen. Als Grundtemperatur werden 6 - 8 °C angegeben. Das Aufheizen und Abkühlen eines Raumes, beispielsweise für Gottesdienste soll mit 1 Kelvin pro Stunde und insgesamt max. 12 Kelvin nur langsam durchgeführt werden.

Diese Anleitung zum langsamen Aufheizen steht konträr zu den Empfehlungen von [Künzel 1991]. Dort wird exakt das Gegenteil empfohlen, da bei einem schnellen Aufheizen durch thermische Trägheit der Kunstwerke an den Oberflächen kaum Veränderungen der relativen Feuchte passieren und eine verstärkte Desorption der oberflächennahen Schichten zu einer letztendlich geringeren Änderung der relativen Feuchte im Raum führt.

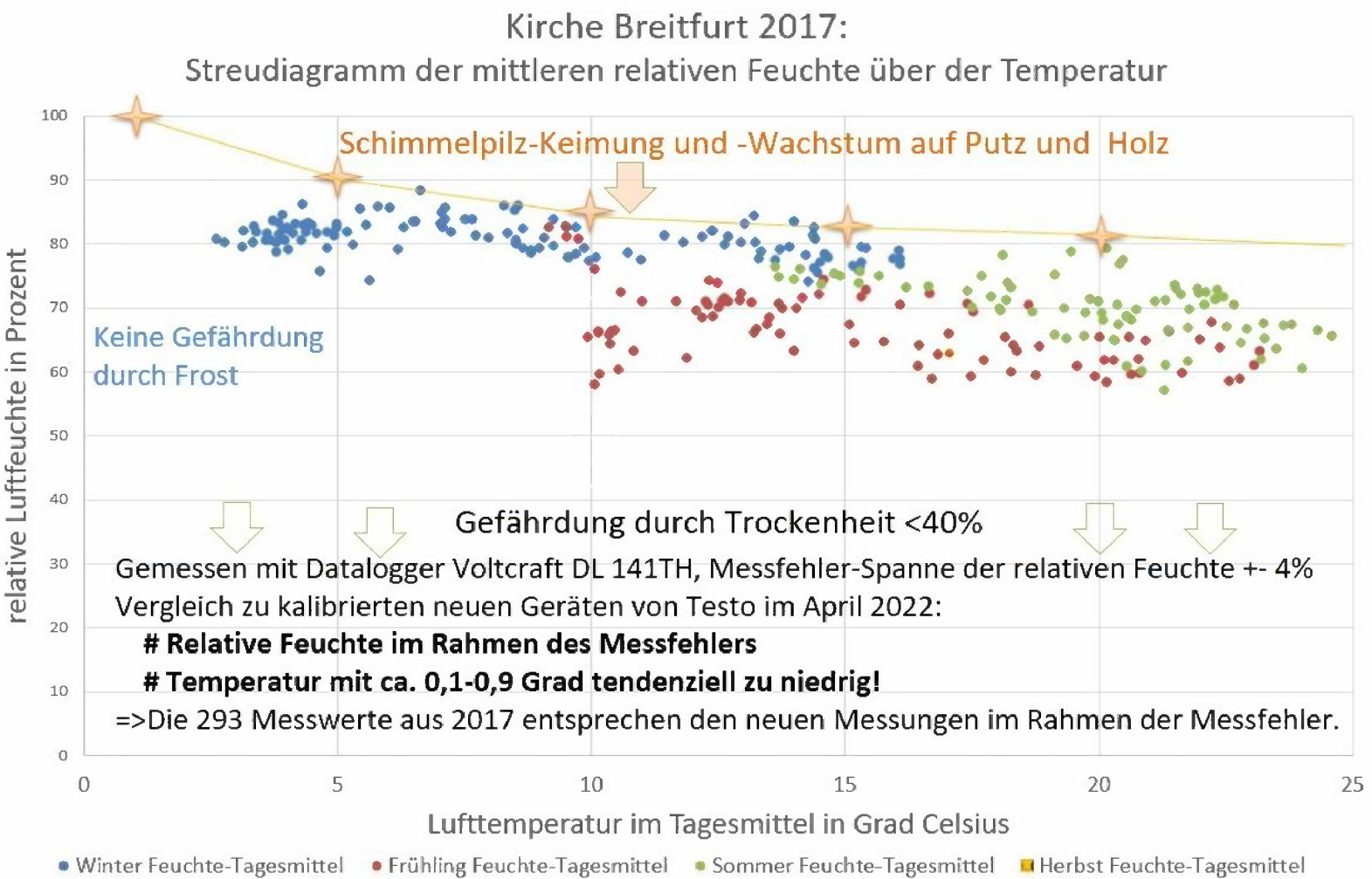
Schließlich wird in [Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2002] ein Erfahrungswert aus restauratorischer Sicht angeführt, der sehr nah an der aktuellen Diskussion liegt: „Ein bestehendes Raumklima gleich welcher Werte, das an der Ausstattung keine Schäden hervorruft, bedarf keiner Veränderung.“

Als Fazit der Diskussion der Literatur zu Feuchteschäden an Baudenkmalern und Kunstobjekten fasst [Kilian 2013] zusammen, dass die Grenzen unschädlicher Bereiche der Klimaparameter **nicht** bekannt sind.

Damit ist nicht gesichert, welche Bereiche von Temperatur und Luftfeuchte bei der Klimatisierung von Gebäuden genutzt werden können. Wegen des unzureichenden Standes der Forschung ist die Freiheit bei der Gestaltung der Klimabedingungen eines Gebäudes eingeschränkt. Übertriebene Vorsicht scheint jedoch auch nicht angeraten zu sein. Bei der Planung einer Klimatisierung zum Schutz vor zu hoher Feuchte könnte eine Simulation mittels Software helfen. So bietet dazu das Fraunhofer-Institut eine Software-Familie WUFI (**W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär). Sie dient zur realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen. Es basiert auf den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigtransport.

<https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>

Streudiagramm der Luftfeuchte in der Kirche Breifturt 2017



Streudiagramm der Feuchte der Kirche Breifturt im Verlauf des Jahres 2017

19.04.2023 – ergänzt 23.08.2023

Aus früheren Jahren sind fortlaufende Messungen der Temperatur und relativen Feuchte im Saal der Kirche vorhanden. Sie wurden zu Tagesmittelwerten verdichtet und für das Jahr 2017 in einem Streudiagramm nach [Kilian 2013] dargestellt. Die relative Feuchte ist über der Lufttemperatur im Kirchensaal aufgetragen.

Das Diagramm zeigt viele Tage an, bei denen die Bedingungen für das Keimen und Wachstum von Schimmelpilzen gegeben ist. Dagegen scheint keine Gefährdung durch Frost im Saal zu bestehen. Zu trocken ist es in keinem Fall. In allen Jahreszeiten besteht die Gefährdung der Schimmelbildung. Im Winter ist die relative Luftfeuchte besonders hoch. Diese Messwerte aus 2017 zeigen den kritischen Zustand des Raumklimas im Kirchenraum.

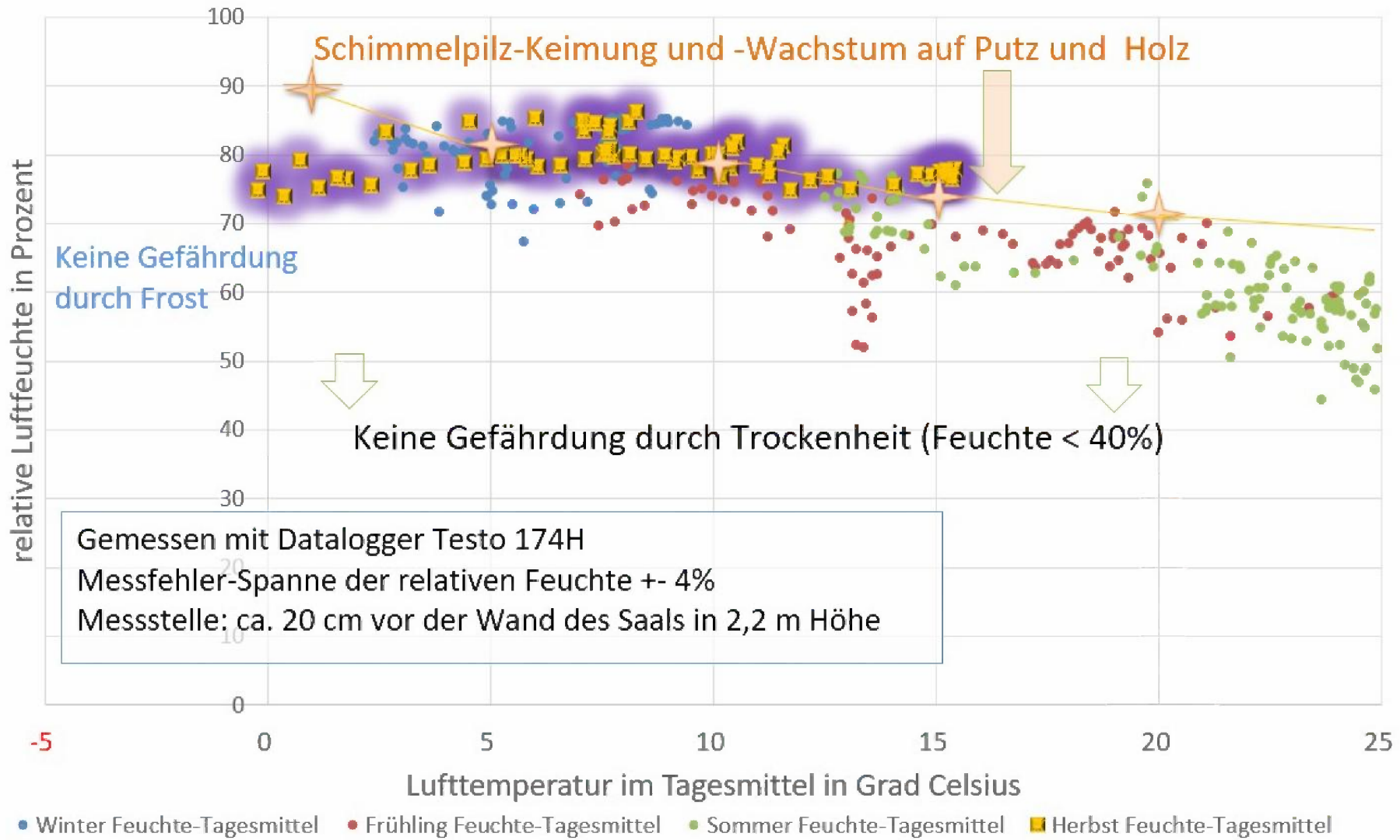
Die relative Feuchte zeigt sich in diesem Diagramm gerade an einer Grenze von Lebensbedingungen des Schimmels – diese Grenze ist jedoch Messreihen über maximal einigen Wochen zuzurechnen. Schimmelbildung ist daher langfristig möglich. Auch ist der Messfehler der relativen Feuchte von 4% zu berücksichtigen.

Olfaktorisch zeigt sich im Winter und Frühjahr immer wieder der Geruch von Schimmel.

Das Streudiagramm für das Jahr 2022 zeigt die gleichen Verhältnisse – siehe folgende Seite.

Frost tritt an wenigen Tagen auf, jedoch bezieht sich dies auf die Messstelle in 2,2 m Höhe vor der Innenwand. Die boden-nahen Messstellen sind frei von Frost.

Kirche Breitfurt 2022 (Feb. 22 bis Jan. 23): Streudiagramm der mittleren relativen Feuchte über der Temperatur



Messgeräte – Datalogger, Materialfeuchte, Anemometer

Datalogger

Vier Datalogger für Feuchte und Temperatur sind im Kirchenraum ab Februar 2022 installiert.

Gewählt ist das gleiche Modell Testo 174H, das laut Kalibrierprotokoll Messfehler für die Temperatur von 0,1°C und für die Feuchtigkeit von 0,2 % rH auf. Die Abweichung der Temperatur konnte in einer kurzen Messspanne im Wohnhaus bestätigt werden, die relative Feuchte hatte dagegen Abweichungen untereinander von 1,3 % rH.

Im Turm oberhalb der Empore ist der Datalogger Testo 175 H1 eingebaut.

Übersicht des Einsatzortes der Geräte:

Nr.	Einsatzorte Datalogger für Feuchtigkeit und Temperatur	Höhe über Fussboden des Saals (Empore)	Testo Datalogger Modell	Toleranz Temperatur °C	Toleranz rel.-Feuchte % rH	Serien-Nummer
	Turm, innen, ca. 0,75 m vor Schall-Jalousie in Ost, ca. 2,3 m West	ca. 13 m	175 H1	0,4	2,0	44637020
1	Orgel auf Empore, neben Manual, nahe am offenen Luftraum des Saals	2,85m + 1,5m	174 H	0,5	3,0	83485913
2	Gehäuse der Orgel , innen eines dreiseitig geschlossenen Gehäuses mit Höhe 1,7 m, oben offen - ab dem 10.05.2022 auf dem Parkettboden im Saal (EG)	2,85m + 0,8m (0,8 m)	174 H	0,5	3,0	83485925
3	Saal, Sitzbereich, an östlicher Wand, Wandabstand 0,24m, 9. Sitzbank von Portal	2,2 m	174 H	0,5	3,0	83482940
4	Saaleck, bodennah und direkt auf der Wand, Südost, 0,61m von Giebelwand	0,27 m	174 H	0,5	3,0	83532718

Als Messstelle für die Außenluft ist der Bereich um Glocken und Schall-Jalousie im Dachreiter gewählt. Das eingesetzte Modell Testo 175H1 ist gegen kondensierende Feuchtigkeit mit einem Teflon-Sinterfilter geschützt.

Der Messort ist gegen direkte Sonnen-Einstrahlung und Regen geschützt.

In den Jahren 2014 bis 2018 hat ein Datalogger von Voltcraft DL-141-TH an der Messstelle 1 beim Spieltisch der Orgel 15-Minuten-Mittelwerte aufgenommen.

Vergleich der Messwerte von altem und neuem Datalogger, am Spieltisch der Orgel:

Datum	Alt: Voltcraft DL-141-TH		Neu: Testo 174 H		Abweichung Feuchte Alt zu Neu (testo) %
	Temperatur °C	Rel. Feuchte %	Temperatur °C	Rel. Feuchte %	
01.04.22 16:30	9,4	71,9	9,6	73,8	+ 1,3
19.04.22 10:31	13,1	59,4	14,0	55,9	- 3,5
10.05.22 18:00	18,5	63,0	19,1	59,9	- 3,1
08.06.22 16:40	18,6	71,2	18,9	68,8	- 2,4
17.06.22 14:40	22,6	49,1	23,3	44,7	- 4,4
23.06.22 17:00	23,0	67,2	23,4	63,7	- 3,5

Die Messwerte des in den Jahren 2014 bis 2018 eingesetzten Dataloggers Voltcraft DL-141-TH stimmen im Rahmen der Messfehler mit den Werten des Gerätes Testo 174 H überein.

Die gemessene relative Luftfeuchte bei höheren Temperaturen ist beim alten Gerät etwa um die Messfehler-Spanne höher als beim neuen, kalibrierten Messgerät.

Aufbereitung der Messdaten der Datalogger

Messwerte der Feuchte und der Temperatur sind für vier Messstellen im Raum und eine Messstelle im geschützten Außenbereich (Turm im Bereich der Schalljalousien) aufgenommen.

Die Testo-Datalogger sind so eingestellt, dass sie die Temperatur und die relative Feuchte alle 15 Minuten ab der vollen Stunde speichern. Die Messdaten aller Datalogger liegen damit zum gleichen Zeitpunkt vor. Nach Auslesen der Messdaten, die im Datei-Format EXCEL 97-2003 vorliegen, werden sie durch Kopieren in einer einzigen Tabelle zeitgleich zusammen gefasst.

Die Datei wird in das kompatible Format EXCEL 2016 überführt (Datei – Informationen – Auf Probleme überprüfen – Kompatibilität prüfen), um die volle Funktionalität der Diagramm-Erstellung zu erhalten.

Zudem wird aus den Werten von Temperatur und relativer Feuchte die absolute Feuchte der Raumluft – die Dichte des Wasserdampfs – errechnet.

Anemometer

Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einem Hitzdraht-Anemometer gemessen. Verwendet wird das Thermo-Anemometer mit Smartphone-Bedienung Testo 405i in Verbindung mit einer Software von Testo „Smart Probe“.

Gemessen werden gleichzeitig Luft-Geschwindigkeit und Luft-Temperatur. Die Genauigkeit der Geschwindigkeit ist 0,1 m/s im Bereich von 0-2 m/s (5% vom Messwert), über 2 m/s bis 15 m/s beträgt sie 0,3 m/s. Die Genauigkeit der Temperatur ist +/- 0,5°C. Das Messintervall ist fest auf zwei Sekunden eingestellt.

Messung der Feuchtigkeit in den Baustoffen

Die Feuchtigkeit in den Baustoffen in der Kirche wird mit dem Materialfeuchte-Messgerät – Testo 606-1 – mit einer Genauigkeit von 1 % gemessen. Materialkennlinien sind für verschiedene einheimische Hölzer, Ziegel, Beton und Bauputze hinterlegt. Der Messbereich beträgt für Kalkmörtel und Gips 0,6 bis 9,9 Gewichts-%, bei Holz bis 25 Gewichts-%. Die Materialfeuchte wird in Gewichtsprozent bezogen auf die Trockenmasse (Därrgewicht) angegeben.

Die Kennlinien unterscheiden sich stark. Daher ist auch die Wahl der passenden Kennlinie bzw. des Baustoffs wesentlich.

Aus der Bedienungsanleitung von Testo:

Kennlinie	Material	trocken	bedenklich	feucht/ sehr feucht
Kennlinie 1 oder 2, innen beheizt	Buche, Fichte, Lärche ...	< 12	12 ... 15	>15
Kennlinie 1 oder 2, innen unbeheizt	Eiche, Kiefer, Ahorn ...	< 15	15 ... 20	> 20
Kennlinie 3	Zement-Estrich	<3	3 ... 5	>5
Kennlinie 3	Beton	< 2.2	2.2 ... 4.4	> 4.4
Kennlinie 4	Anhydrit-Estrich	< 0.5	0.5 ... 1	> 1
Kennlinie 5	Zementmörtel	<3	3 ... 5	>5
Kennlinie 6	Kalkmörtel, Gips	<2	2 ... 4	>4
Kennlinie 7	Mauerziegel	< 1	1 ... 3	>3

Laut Bedienungsanleitung sind die beiden Elektroden des Materialfeuchte-Messgeräts etwa 4 bis 5 mm tief in den Baustoff einzustecken. Dies ist bei weichen Putz möglich.

Allerdings müssen beim Eichenparkett kleine Bohrungen von 2 mm Durchmesser in das Holz als Messstelle eingearbeitet werden. Bei geringerer Tiefe der Elektroden im Material ist die angezeigte Feuchte 1 bis 2 Prozentpunkte zu klein. Um die beiden Messspitzen in gutem Kontakt zum Fußboden zu bringen, wurden zwei Bohrungen mit 2 mm Durchmesser in den Boden etwa 4 mm tief an den zwölf Messstellen eingebracht. An diesen Stellen wurde immer wieder gemessen.

Messung im Fußboden

Gewählt Kennlinie 2 für Holz wie Eiche in einem allseitig geschlossenen Gebäude ohne Heizung. Werte sollen sich dann nach gewisser Zeit des Einbaus auf etwa 12 % +/- 3 % einstellen.

Messwerte um 16 bis 18 Gew.-% bezogen auf Trockenmasse stellen sich ein.

Bild des Eichenparketts



Messung im Putz der Seitenwand, in kleiner Distanz über Fußboden

Um aufsteigende Feuchte aus dem Fundament zu erfassen, wird die Feuchte des Innenputzes in geringer Höhe über dem Fußboden in verschiedenen Höhen gemessen.

Die Feuchtigkeit in den Baustoffen in der Kirche wird mit dem Materialfeuchte-Messgerät – Testo 606-1 – mit einer Genauigkeit von 1 % gemessen. Materialkennlinien sind für verschiedene einheimische Hölzer, Ziegel, Beton und Bauputze hinterlegt. Der Messbereich beträgt für Kalkmörtel und Gips 0,6 bis 9,9 Gewichts-%, bei Holz bis 25 Gewichts-%. Die Materialfeuchte wird in Gewichtsprozent bezogen auf die Trockenmasse (Därrgewicht) angegeben.

Die Höhe der Messstellen im Putz der Seitenwand über Fußboden orientieren sich an Markierungen in der Wand, wie die unterste Messstelle gerade über Fußleiste (3 cm), Wechsel des Farbanstrichs von braun auf weiß (12 cm) und gerade über dem Kabelkanal (32 cm). In der jeweiligen Höhe wird in etwa 10 cm Abstand ein zweiter Messwert aufgenommen.

Die Ausführung der Messung erfordert ein möglichst tiefes Einstecken der Messspitzen in den Putz, etwa 4 mm tief. Der Messwert sinkt im Verlauf von ein paar Sekunden. Notiert wird der Messwert nach einigen Sekunden, der sich bei festem Druck mit den Mess-Elektroden auf die Wand einstellt. Im Abstand von etwa 10 cm seitlich wird ein weiterer Messwert aufgenommen.

Im Februar 2022 sind Messwerte orientierend mit der Annahme aufgenommen, dass der Innenputz der Kirche aus dem 18. Jahrhundert aus Kalkputz bestehe. Die mit Kennlinie 6 für Kalkputz ermittelten Messwerte betragen weniger als 2 Gew.-% Feuchte, also eine trockene Wand. Dies steht im Gegensatz zur hohen Luftfeuchte, die zumindest bedenklich hohe Materialfeuchte erwarten lässt.

Später wurde bekannt, dass der Putz im Sockelbereich ein Sanierputz ist, der Umgebungsluft ableitet und selbst nur wenig Feuchtigkeit aufnimmt.

Sanierung des Putzes in 1999

Der langjährig für die Kirchengemeinde Breitfurt tätige Architekt Horst Hühner erinnert sich, dass vor Jahrzehnten Sanierputz aufgetragen wurde und dass ansonsten nach dem zweiten Weltkrieg nur geringe Flächen des Innenputzes erneuert werden mussten. Das Mauerwerk bestehe aus Sandstein und Kalkmörtel.

Die Rechnung der Firma bbr-Bausanierungen GmbH, Eppelborn, vom 01.12.1999 (Telefon 0 68 27 - 9010-0) weist diese Arbeiten aus:

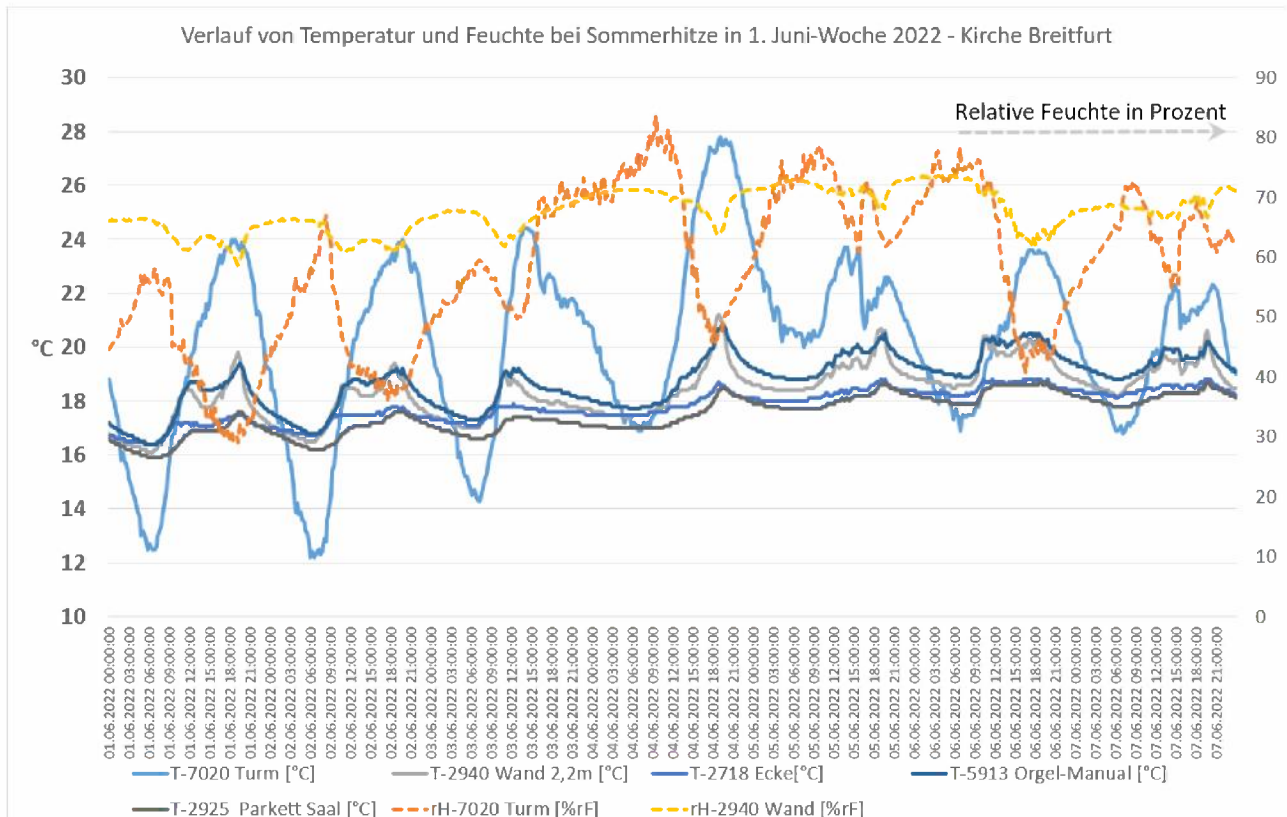
- X Außenfassade. Putz rings herum bis zu 2,16 m Höhe abgeschlagen (92,44m²), sandende Fugen ausgebaut, Salzsperre aufgetragen, Spritzbewurf aufgetragen, Salzspeicherputz und Mehrauftrag von 1,5cm Salzspeicherputz, Sanierputz und Sanierglätte aufgetragen
- X Innenputz. Putz rings herum abgeschlagen (59,07m²), auf der linken Seite (Wiesenweg) bis zu 1,22 m Höhe und rechts bis 1,17 m. Fugen ausgeräumt, Salzbehandlung aufgetragen, Spritzbewurf hergestellt, Ausgleichputz aufgetragen, Ausgleichputzmehrstärke von 1 cm aufgetragen, Sanierputz und Oberputz aufgetragen.

Mess-Ergebnisse

Die Messwerte für Temperatur, relative Feuchte und Dampfdichte (absolute Feuchte) werden im folgenden dargestellt.

Tagesgang der Temperatur über wenige Tage

Die Temperaturen im Innenraum an vier Messstellen haben den gleichen täglichen Verlauf mit einem Maximum am Tag und einem Minimum in der Nacht.



Die durchgezogenen Linien repräsentieren die 15-Minuten Momentanwerte der Temperatur, die gestrichelten Linien die relative Feuchte. Auffällig ist der ausgeprägte Tagesgang der Temperatur und Feuchte.

Die Außentemperatur (Turm) verläuft im Tagesgang von 12°C bis 24°C, eine Amplitude von 12 Kelvin.

Die Temperaturen im Innenraum haben nur eine Amplitude von 2K bis 4K. Das Maximum der Temperatur vor der Saal-Wand in 2,2 m Höhe wird in der Zeit von 11 Uhr bis 15 Uhr erreicht (Februar 2022).

Die Temperatur „T-2940 Wand 2,2m“ wird in einem Abstand von 0,3m von der Wand frei im Saal gemessen. Die Messstelle liegt außerhalb der Grenzschichtströmung des Wärmeübergangs an der Innenwand, sie repräsentiert die Temperatur des Kirchensaals in 2,2m Höhe.

Sehr ähnlich ist die Temperatur „T-5913 Orgel-Manual“. Ihre Messstelle befindet sich auf der Empore außen am Gehäuse der Orgel über dem Luftraum des Saals.

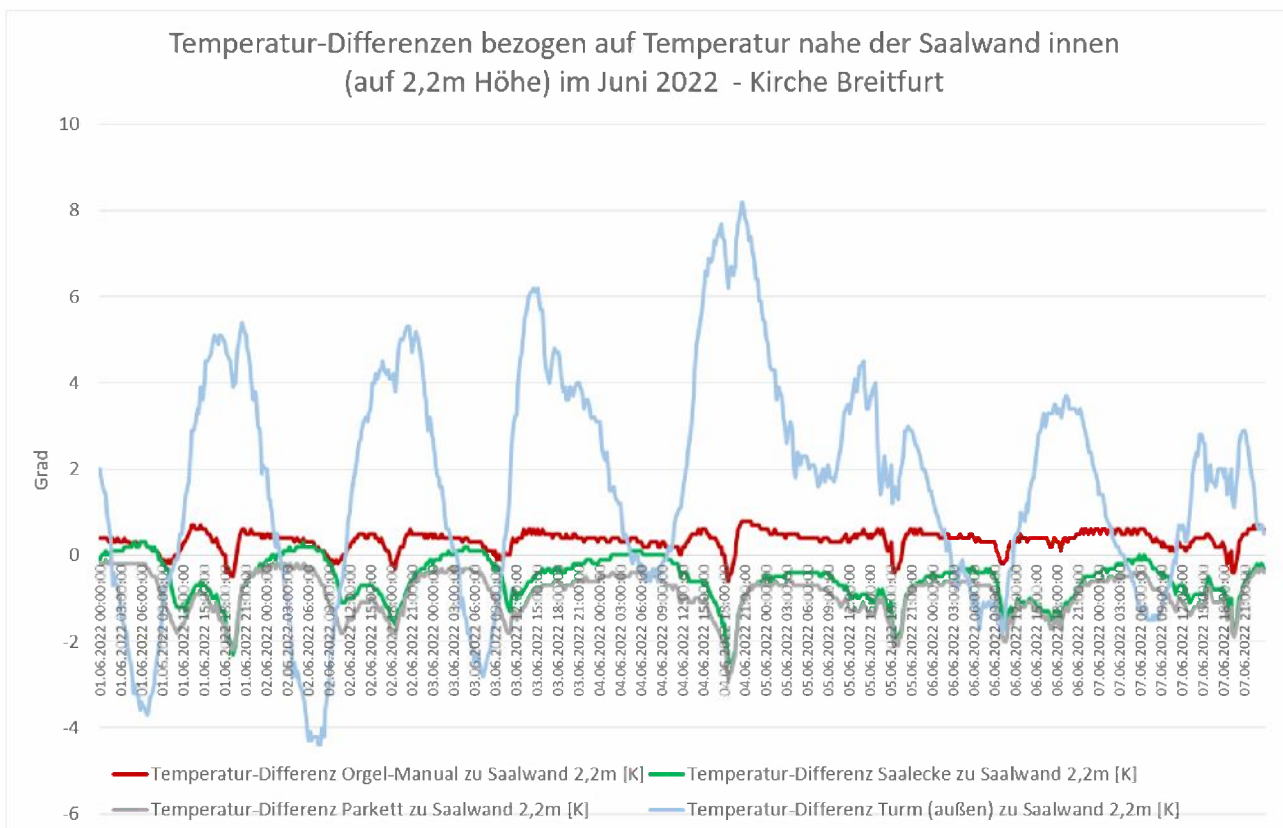
Bei Erwärmung des Innenraums im Lauf eines Tages folgen diese beiden Temperaturen

der Außentemperatur.

Beide Temperaturen werden herangezogen, um die repräsentative Temperatur des Innenraums als Mittelwert zu bilden.

Die Messstelle Ecke befindet sich an der 0,4 m über dem Boden in einer Saalecke und die Messstelle Parkett direkt auf dem Parkettboden mitten im Saal. Sie sind niedriger als die repräsentative Temperatur des Innenraums und folgen dem Tagesgang mit geringer Amplitude.

Temperatur-Differenzen – repräsentative Saaltemperatur



Der Unterschied zwischen einzelnen Messstellen wurde für einen Zeitraum von zwei Wochen für den Februar und eine Woche im Juni 2022 ausgewertet. Die Differenzen sind mit der Temperatur nahe der Saalwand innen gebildet.

	Standardabweichung der Temperatur-Differenz [K]			
	Orgel-Manual zu Saalwand	Saalecke zu Saalwand	Orgel-Gehäuse zu Saalwand	Turm (außen) zu Saalwand
11.-28. Februar 22	0,19	0,34	0,30 Gehäuse	2,88
1. - 7. Juni 22	0,22	0,52	0,48 Parkett	2,63

Die Standardabweichung der Temperatur-Differenz von Orgel-Gehäuse zu Saalwand ist kleiner als die Messfehler-Spanne von 0,5K.

Ab dem 10.05.22 wird statt im Orgel-Gehäuse auf dem Parkettboden des Saals

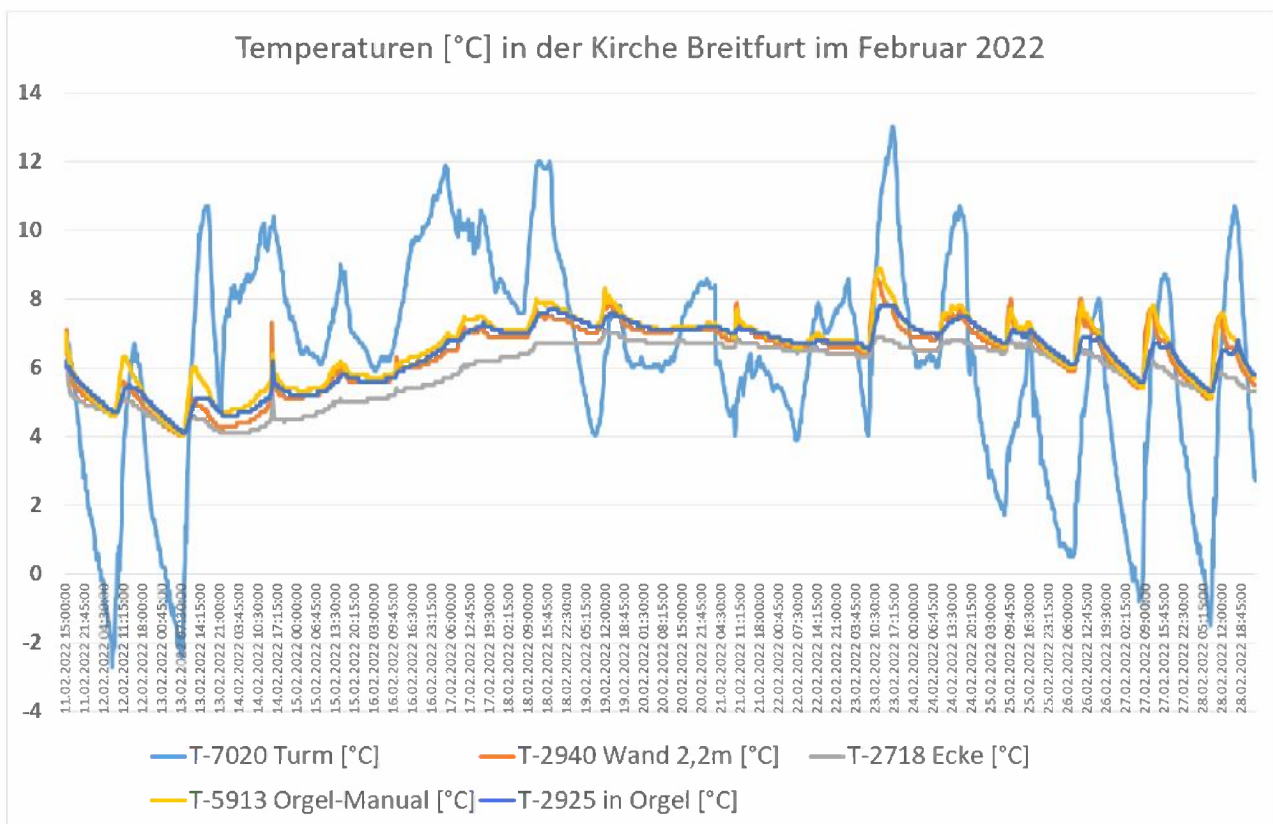
gemessen.

Der Mittelwert der Temperatur der Messstellen „T-2940 Wand 2,2m“ und „T-5913 Orgel-Manual“ ist die repräsentative Temperatur des Innenraums.

Die Messwerte aus dem Orgel-Gehäuse zeigen den gleichen Verlauf wie die Werte am Orgel-Manual. Der Prospekt der Orgel ist für Luftströmung offen, daher ist eine gute Durchmischung wie im übrigen Kirchenraum plausibel.

Temperaturen im Winter und Sommer

Februar 2022

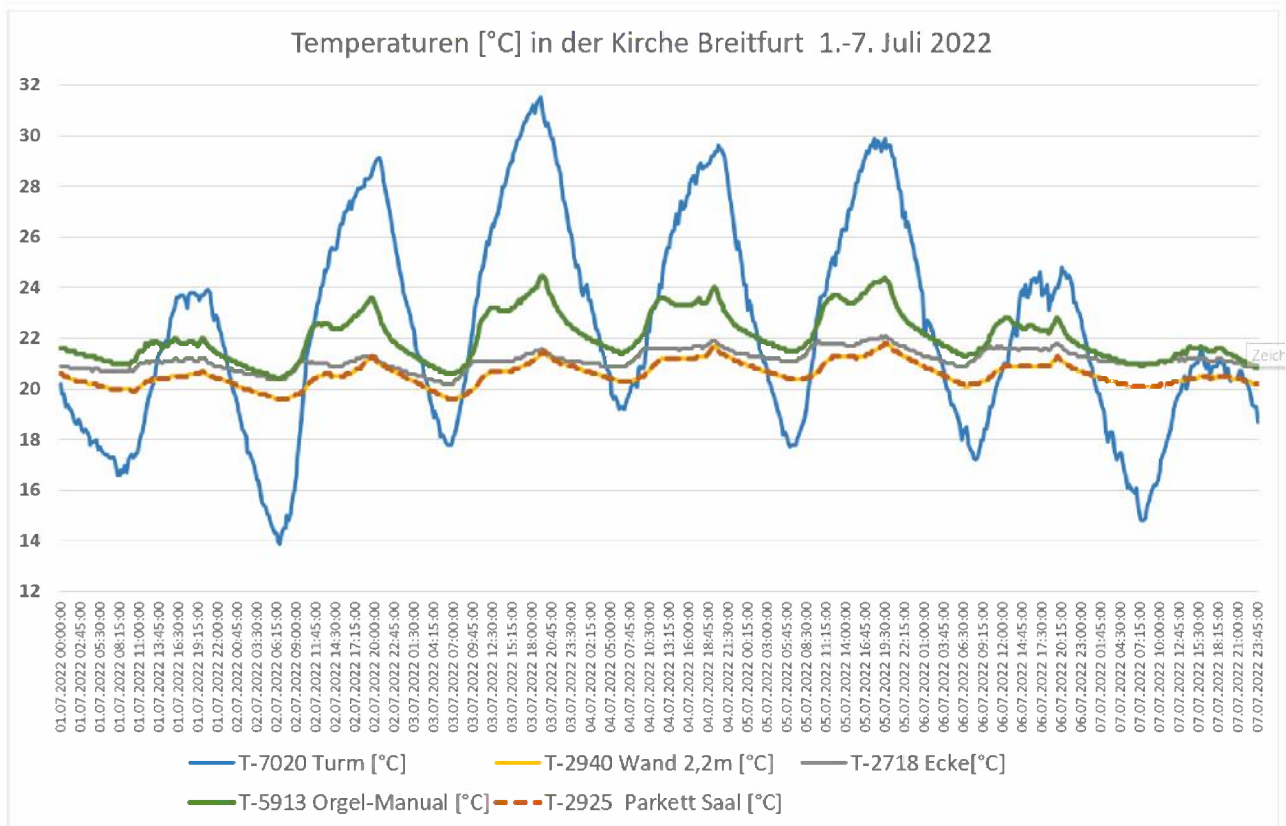


Wetter-Daten:

35 mm Regen an 10 von 17 Tagen (14.2. - 25.02.2022)

5/8 Bedeckung des Himmels mit Wolken

Woche vom 1.-7. Juli 2022



Die Verläufe der Temperatur von Wand 2,2m Höhe und Parkettboden sind fast identisch.

Die Temperatur in der Ecke an der besonnten Außenwand ist höher als der Parkettboden und Außenwand in 2,2m Höhe.

Besonders auffällig ist die Temperatur auf der Empore am Orgel-Manual. Sie ist die höchste Temperatur im Innenraum. Im Winter – siehe oben den Februar – ist sie dagegen häufig ähnlich der Temperatur des Saals.

Dies deutet auf ungleichmäßige Durchmischung des Raumvolumens mit einer Schichtung der Temperatur hin.

Wetter-Daten:

kein Regen

geringe Bedeckung des Himmels mit Wolken

Verlauf der Feuchte und Tagesschwankung

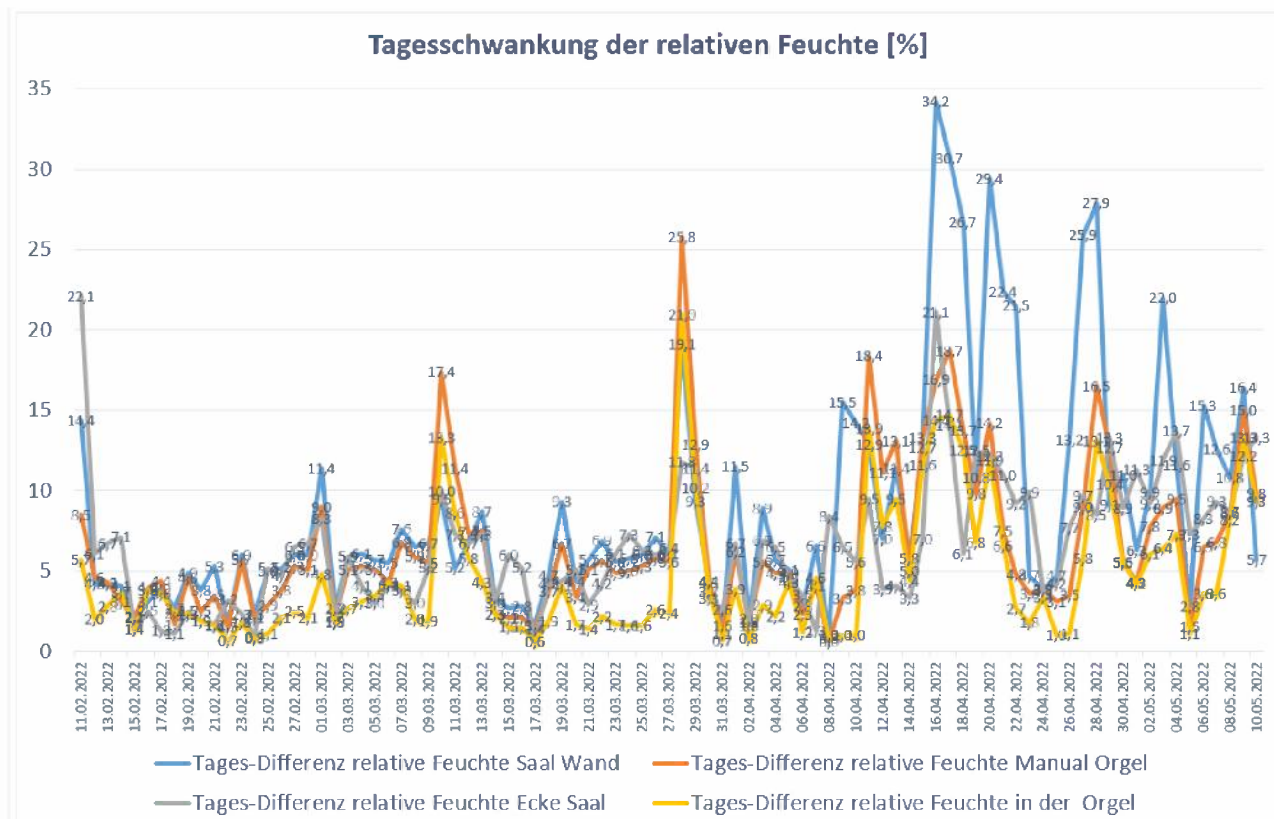
Die relative Feuchte in der Kirche ist in den kalten Monaten des Jahres hoch und in den warmen niedriger. Die Momentanwerte erreichen im Februar 85% und bewegen sich in der Spanne von 70% bis 85% an den Messstellen Wand, Orgel-Manual und im Orgel-Gehäuse.

Die relative Feuchte in der boden-nahe Ecke der Kirche ist stets um etwa 10% höher als an den anderen Messstellen. Ihre Spanne ist bis in den April hinein etwas über 90% bis 75%.

Dies deutet auf einen Transport von Wasserdampf aus dem Fundament über das aufgehende Außen-Mauerwerk in den Kirchensaal.

Im April 2022 sind einzelne stark abweichende Werte der Feuchte und der Temperatur vor der Saal-Wand gemessen. Die Feuchte fällt gegen 19 Uhr auf Werte um 30% und die Temperatur steigt auf etwa 25°C. Die Änderung betrifft nur wenige Momentanwerte und ist sehr ausgeprägt.

Die tägliche Sonnenscheindauer ist gerade laut DWD an den fraglichen Tagen sehr hoch. Vermutlich scheint die Abendsonne gerade auf die Messstelle vor der Wand im Westen. Nur wenige Tage sind betroffen.



Die Tagesschwankung der relativen Feuchte der Luft an den Messstellen in der Kirche ist meist mit Differenzen unter 10% gering.

Daneben treten an Tagen mit hoher Sonnenscheindauer auch weit größere Schwankungen auf. Auch die Messstellen, die offensichtlich nicht von der Abendsonne berührt sind, haben **natürliche** Schwankungen von 15 bis 20%.

Die Heizungs-Richtlinie der Landeskirche nennt als gewöhnliche, anzustrebende

Schwankung der relativen Feuchte eine Spanne von 10%.

Im ersten Quartal des Jahres wird die Kirche nicht genutzt, stattdessen finden Veranstaltungen im Gemeindehaus statt. Danach fanden bis zum 31.07.2022 zehn Gottesdienste in der unbeheizten Kirche statt.

Wegen der Corona-Pandemie wird die Kirche auch im ganzen Jahr 2022 nicht beheizt.

Die Raum-Temperatur in der Kirche ist im Jahr 2022 nicht durch die Heizung beeinflusst, sondern allein vom Wetter abhängig.

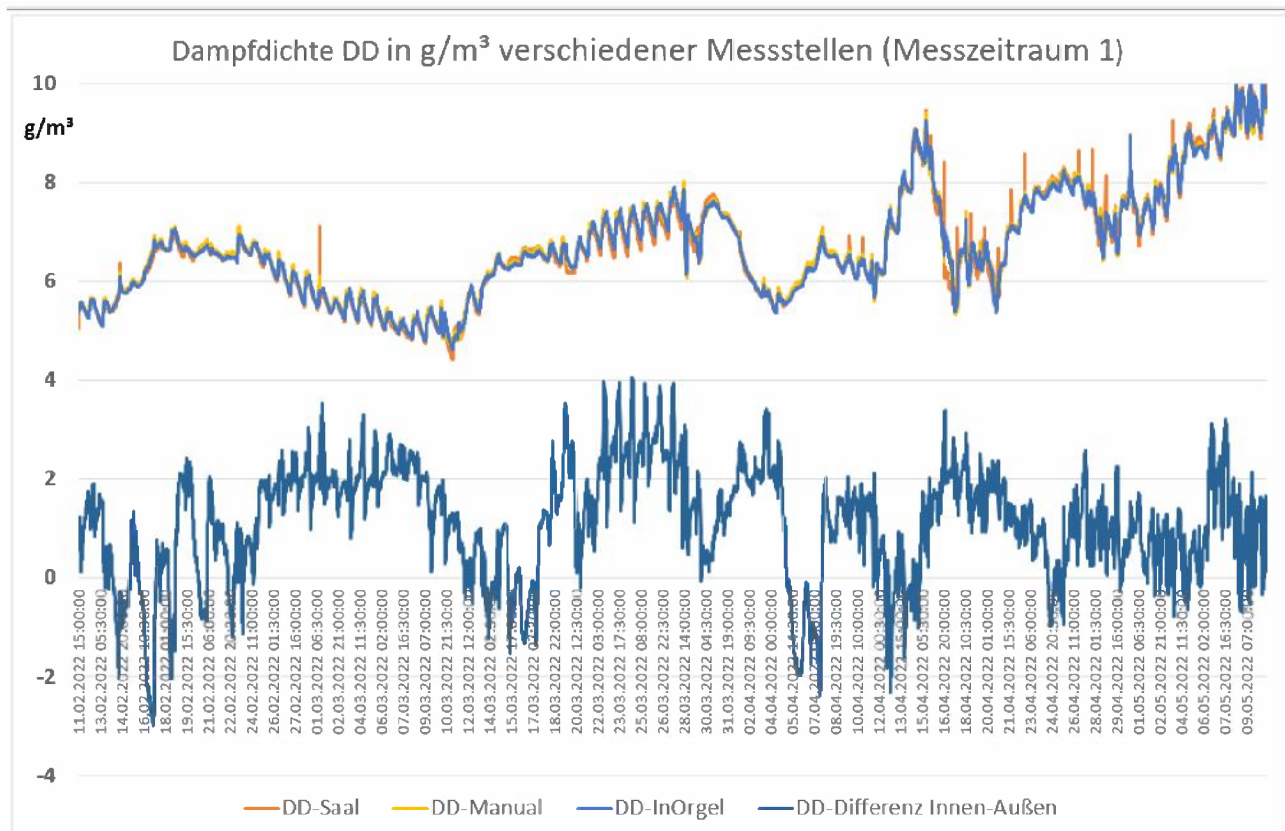
Die Heizungsrichtlinie (Richtlinie für klimafreundliches Heizen in der Evangelischen Kirche der Pfalz vom 22.02.2022) gibt für die Temperierung von Kirchen vor:

Für den Erhalt von Kunstgegenständen, der Bausubstanz und der Orgel ist nicht die Temperatur maßgeblich, sondern die relative Feuchtigkeit. Es ist eine möglichst konstante relative Feuchte zwischen 45 bis 65 Prozent anzustreben. Die Änderungen der relativen Feuchte sollten 30 Prozent im Jahr und 10 Prozent während eines Tages nicht überschreiten. Dies kann nur eingehalten werden, wenn die Differenz zwischen Grund- und Nutzungstemperatur 5 Grad Celsius nicht überschreiten.

Daher ist bei Kirchen mit einer hohen baukulturellen Wertigkeit die Regelung der Heizung und / oder einer Lüftung über Feuchtefühler oft zweckmäßig.

Absolute Feuchte und Potential gesteuerter Lüftung

Die absolute Feuchte – die Dampfdichte – ist aus der Temperatur und der relativen Feuchte an der Messstelle nach EN 13829:2000 [Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Wasserdampf-sättigungsdruck Formel (B.3)] berechnet.



Mess-1.xlsx [Dia Verlauf Dampfdichte 1]

Die Dampfdichte in der Kirche ist an den Messstellen sehr ähnlich. Tägliche Schwankungen sind mit ca. 1 g/m^3 gering.

Die Dampfdichte steigt von Februar bis Anfang Mai 2022 von etwa 5 g/m^3 auf 10 g/m^3 .

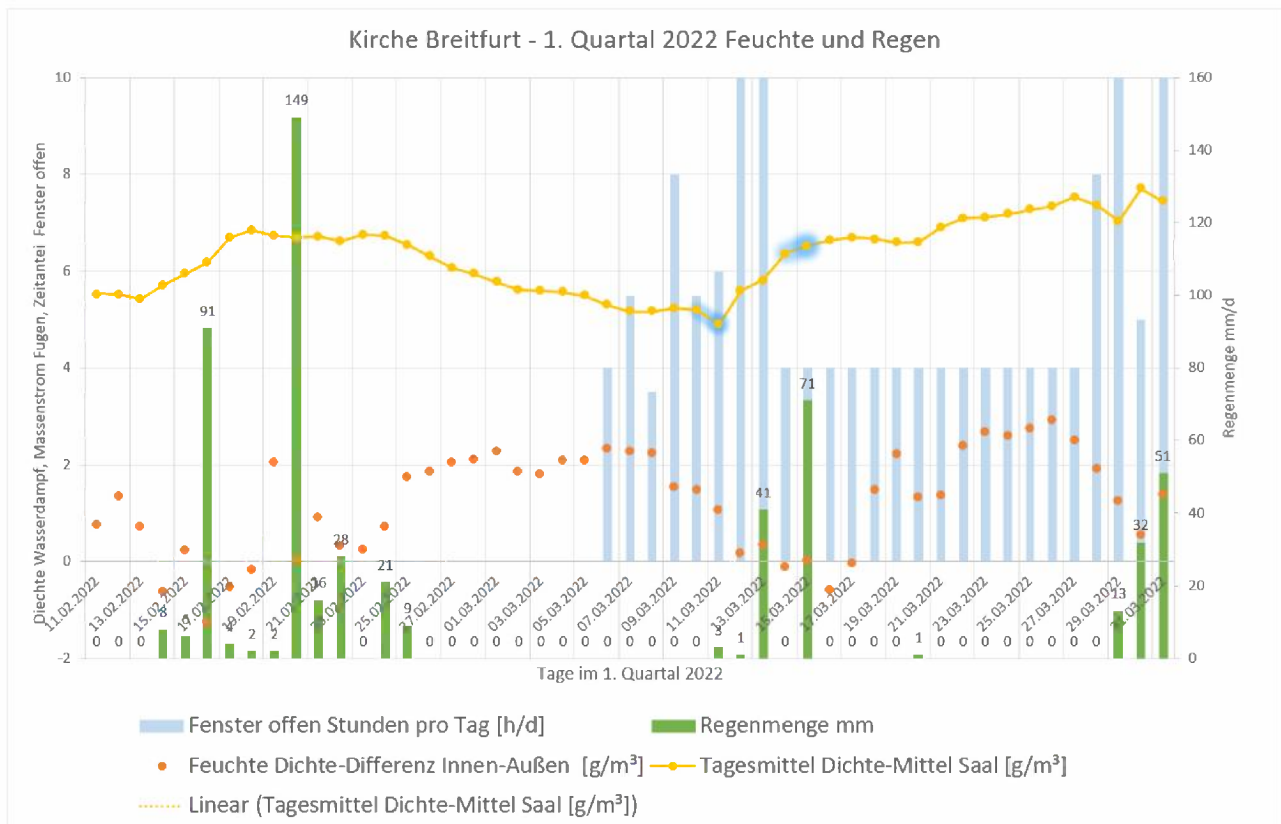
Auffällig ist der Unterschied der Dampfdichte von Innen zu Außen. Innen ist die Dampfdichte an den meisten Tagen größer als Außen. Die mittlere Dampfdichte im Innenraum ist um 1 bis 3 g/m^3 höher als Außen.

Nur an 13 Tagen von 89 Tagen im Zeitraum von Februar bis Anfang Mai 2022 sind die Tageswerte der Differenz der Dampfdichte von Innen zu Außen negativ. Dann wäre das Absenken der Luftfeuchte in der Kirche durch gesteuertes Lüften nicht möglich.

Die Korrektur von Ausreißer-Werten – den vereinzelt stark abweichenden Werten der Feuchte und der Temperatur vor der Saal-Wand Im April 2022 (siehe vorherigen Abschnitt) verändert nicht das Bild, dass von der Feuchte gesteuerte Fenster-Lüftung einen wesentlichen Beitrag zum Trocknen der Kirche leisten könnte.

Ob der Massenstrom der Feuchte, die ausgetragen werden kann, ausreichend ist, wird im Kapitel Bilanz der Feuchte in der Kirche abgeschätzt.

Zusammenhang der Feuchte mit Regen



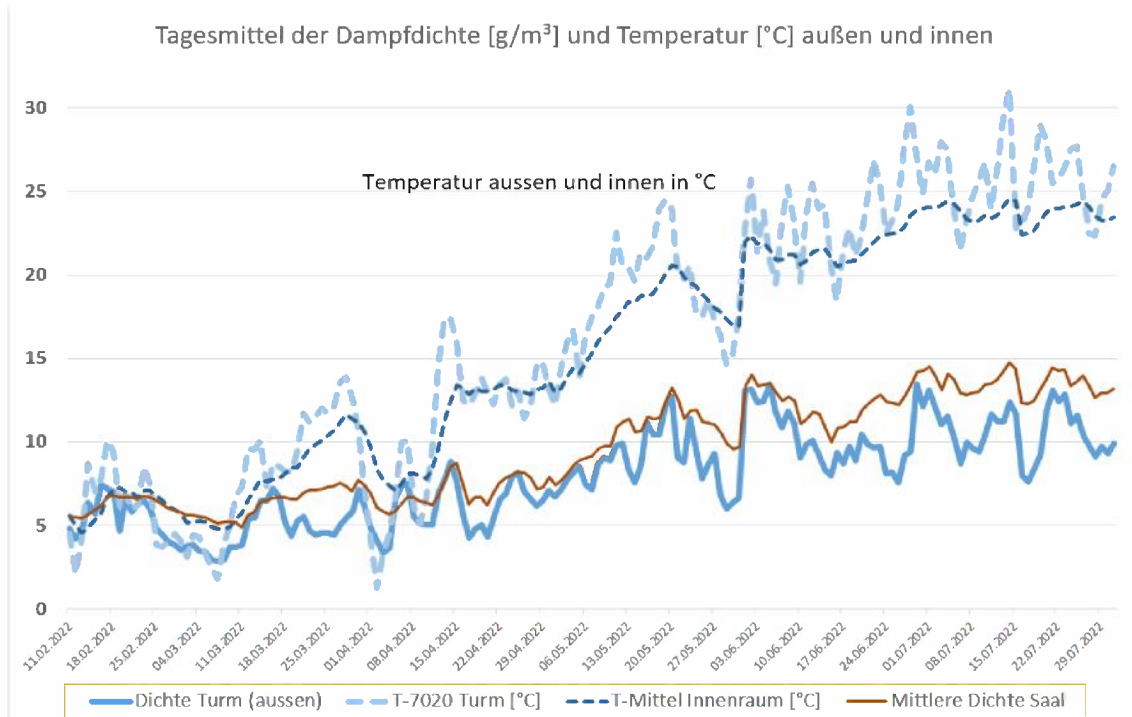
Mess-1.xlsx [Dia Lüftung Regen 1.Q22]

Ein Glaskunst-Betrieb hat hinsichtlich der Feuchte in der Kirche angeregt, einen Zusammenhang von Feuchtigkeit in der Kirche mit Schlagregen auf die nicht mehr ganz dichte Bleiverglasung zu untersuchen.

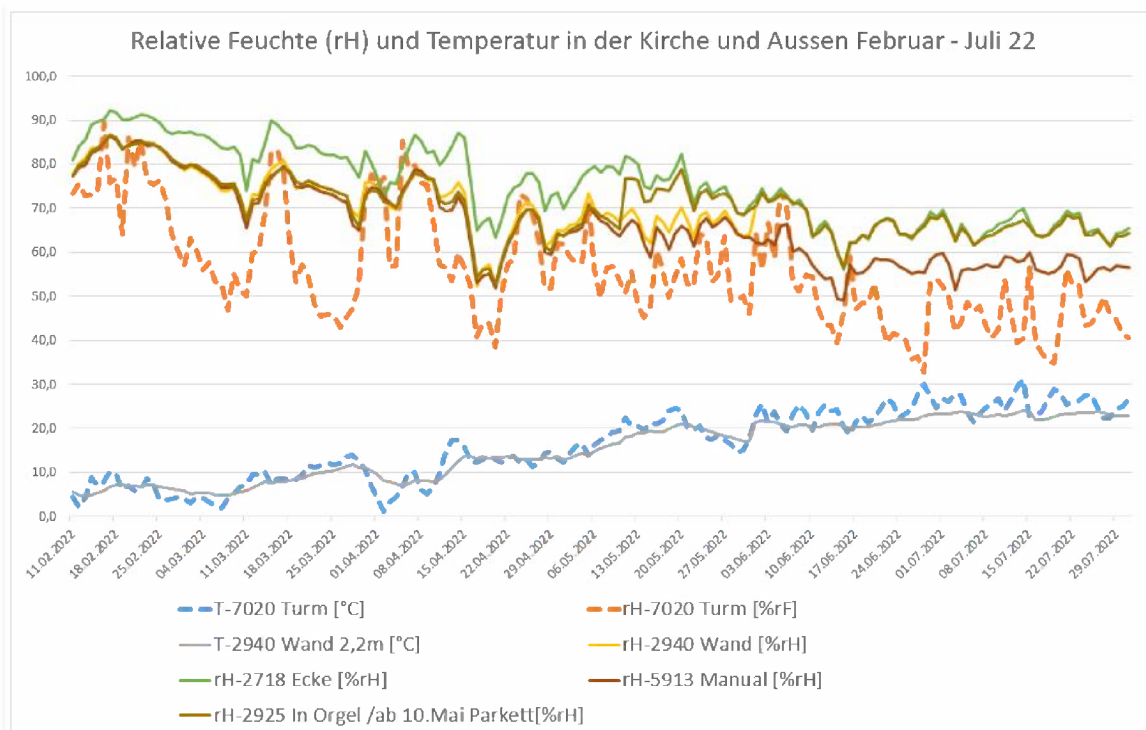
Das obige Diagramm kann den Zusammenhang nicht bestätigen. Diese Hypothese wurde nicht weiter verfolgt.

Tagesmittelwerte aus Messwerten

Um die Bilanzierung der Feuchte in der Kirche über Monate durchzuführen, werden Tagesmittelwerte als Basis für Analyse gebildet. Sie entstammen den Momentanwerten der Temperatur und relativen Feuchte des 15-Minuten Intervalls.



Halbjahresverlauf Dampfdichte und Temperatur - Dia Dampfdichte T-aussen (2)



Dia relative Feuchte Feb-Juli22

Das obere Diagramm zeigt die Tagesmittelwerte der Wasserdampf-Dichte und Temperatur in der Kirche und außen. Der absolute Wassergehalt der Luft wird aus Momentanwerten von Temperatur und relativer Feuchte nach DIN EN ISO 13788:2013-05 berechnet. Die absolute Feuchte wird im folgenden Dichte genannt.

In diesem halben Jahr von Winter bis Sommer steigen absolute Feuchte und Temperaturen sowohl aussen als auch im Innenraum an. Die relative Feuchte verhält sich in diesem halben Jahr umgekehrt; sie sinkt, während der die absolute Feuchte steigt.

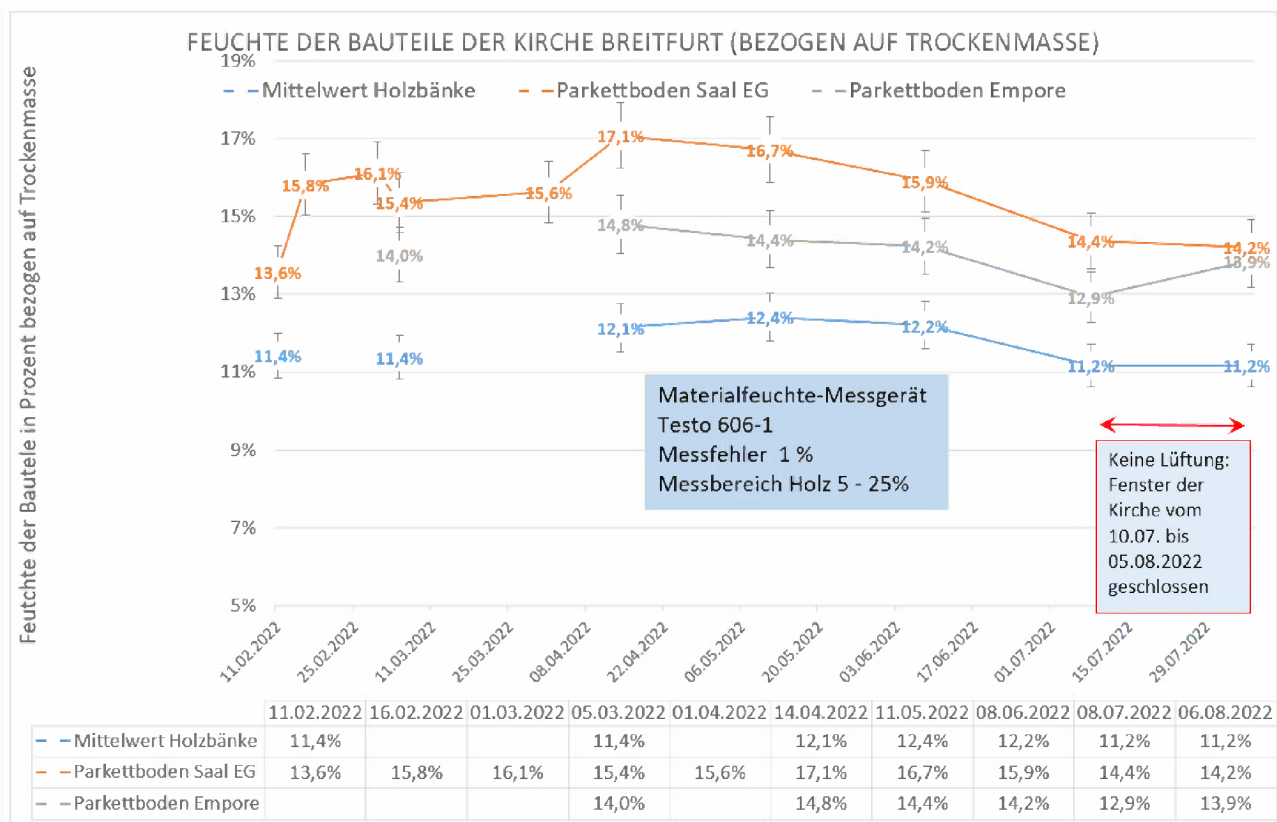
Weitere Einfluss-Größen wie Sonnenscheindauer, Niederschlag, Wind und Öffnungsdauer der Kirchenfenster werden im Kapitel der Bilanzierung berücksichtigt.

Feuchtegehalt der Baustoffe

Die Baustoffe in der Kirche sind Eiche für den Parkettboden, Kalkstein als Bodenbelag, Sanierputz für die untere Beschichtung der Außenmauern und Kiefer für die Bänke. Über Monate wurde die absolute Feuchtigkeit in unregelmäßigen Abständen gemessen. Bis zu 12 Messorte pro Baustoff wurden kontrolliert.

Signifikante Änderungen der Feuchte sind im Verlauf von Februar bis Juli im Parkettboden und im Kiefernholz der Bänke aufgetreten.

Der Feuchtegehalt in den Baustoffen in der Kirche wird mit dem Materialfeuchte-Messgerät – Testo 606-1 – mit einer Genauigkeit von 1 % gemessen. Die Messung Feuchtegehalt wird als Prozentangabe des Wassergehalts bezogen auf die Trockenmasse des Baustoffs angegeben.



Die Messwerte des Wassergehaltes fallen in den warmen Monaten ab. In dieser Zeit wurden tagsüber die Fenster von der Kirchendienerin nach freiem Ermessen geöffnet.

Um den Einfluss der Lüftung zu testen, wurden in der Zeit vom 10.07. bis 05.08.2022 die Fenster ganztägig geschlossen gehalten.

Als Folge fiel der Wassergehalt nicht weiter, sondern erhöht sich etwas.

Da der Wassergehalt der Baustoffe mit der Luftfeuchte im Gleichgewicht stehen kann – siehe Kapitel Ausgleichsfeuchte und Sorptionsisotherme – sollte mit dem sommerlichen Abfallen der Luftfeuchte in der Kirche aus der Wassergehalt der Baustoffe sinken.

Lüftungs-Strom und Wind

Die Geschwindigkeit des Windes steht in direktem Zusammenhang mit der Durchströmung von Luft durch ein Gebäude. Die Durchströmung kann durch geöffnete Fenster und durch Fugen in der Gebäudehülle erfolgen.

Die Lüftung durch Fenster wird von Hand eingestellt. Die Kirchendienerin öffnet und schließt die Klappfenster nach Gutdünken. Wenn das Wetter trocken und warm ist, wird meistens gelüftet.

Die Zeitpunkte und die Dauer des Lüftens sind protokolliert.

Ständige Meßstellen für die Strömung durch die Fenster sind nicht eingerichtet. Stattdessen wurde gelegentlich die Strömungsgeschwindigkeit in geöffneten Klappfenstern gemessen. Diese Messwerte sind mit der Windgeschwindigkeit korreliert, die der Deutsche Wetterdienstes DWD an der nächst gelegenen Wetterstation – Saarbrücken-Ensheim – gemessen hat.

Der Volumenstrom der Durchströmung der Kirche wird mit der Korrelation der Windgeschwindigkeit des DWD und mit den Zeiten des Lüftens errechnet. Aus diesen Daten und dem Unterschied der Feuchte in der Kirche und im Freien errechnet sich der Massenstrom der Feuchte, der die Kirche verlässt.

In den folgenden Abschnitten wird die Korrelation der Windgeschwindigkeit hergeleitet und aus Daten der Kirche der Massenstrom der Feuchte berechnet.

Technische Möglichkeiten der Verbesserung der Trocknung der Kirche werden untersucht.

Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster

Sporadisch werden die Windgeschwindigkeit an der Kirche und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in geöffneten Kirchenfenstern gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Fensteröffnung dient der Ermittlung des Volumenstroms der Luft bei normaler Fensterlüftung.

Die Strömungsgeschwindigkeit des Windes rings um die Kirche soll der Ermittlung der Lüftung durch die Fugen der Fenster (Fugendurchlässigkeit) dienen.

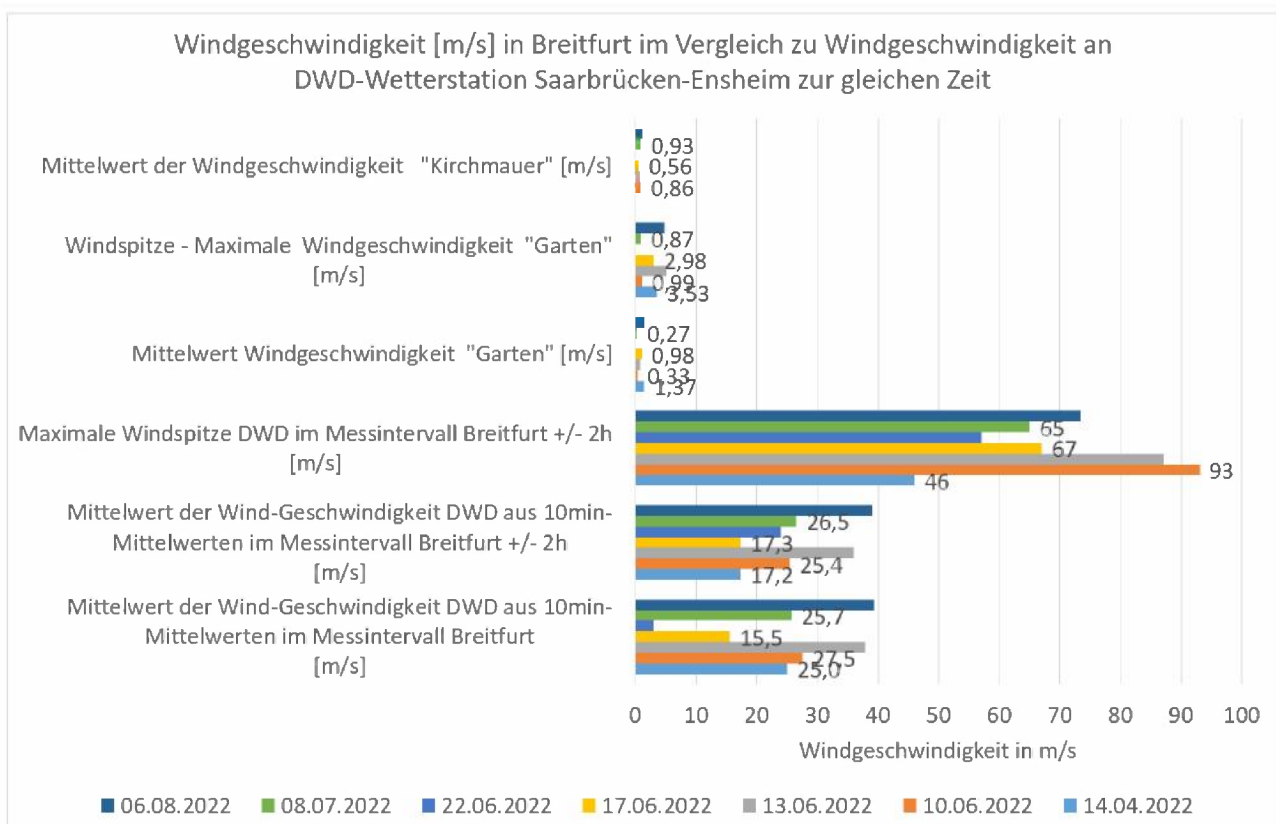
Näheres im Kapitel [Berechnungsmethode zum Wassertransport durch Konvektion](#)

Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit einem Hitzdraht-Anemometer gemessen. Siehe Kapitel [Anemometer](#)

Die Genauigkeit der Geschwindigkeit ist 0,1 m/s im Bereich von 0-2 m/s. Die Genauigkeit der Temperatur ist +/- 0,5°C. Das Mess-Intervall ist fest auf zwei Sekunden eingestellt.

Jeweils über mindestens sechs Minuten wird in der gleichen Position gemessen, entweder auf einer Anlegeleiter am Klappfenster auf der Außenseite oder im Innenraum auf der Empore, jeweils auf der Seite Wiesenweg. Die Messdauer orientiert sich am kürzesten Intervall des DWD für Mittelwertbildung von 10 Minuten.

Die Messstelle ist die Mitte des unteren Teils des geöffneten Fensterflügels. Die Daten eines Messzyklus werden mit einer E-Mail übertragen.



Übersicht der eigenen Messungen und der Messergebnisse des DWD für Saarbrücken

Das obige Säulen-Diagramm zeigt Wind-Geschwindigkeiten zu gleichen Zeiten, die aus eigenen Messungen und vom DWD stammen:

1. Mittelwert Luft-Geschwindigkeit "Kirchmauer"
 - 2,1 m Höhe über Grund, über der Umfassungsmauer von 1,6 m Höhe im Abstand von ca. 2 m zur NO-Ecke der Kirche in der Flucht des Giebels
2. Maximalwert der Luft-Geschwindigkeit im „Garten“ des Pfarrhauses
 - ebenfalls 2,1 m über Grund in einer Lage, die hohe Hecken und Bäume enthält
3. Mittelwert Luft-Geschwindigkeit „Garten“, wie 2.
4. Maximale Windspitze - Maximalwert im 10-Minuten-Intervall der Luft-Geschwindigkeit der DWD-Wetterstation in 10 m Höhe über Grund über der Zeit, die zwei Stunden vor dem eigenen Messintervall beginnt und zwei Stunden danach endet
5. Mittelwert der 10-Minuten-Mittel der Luft-Geschwindigkeit des DWD im langen Zeitraum (wie 4.), der das eigene Messintervall übersteigt
6. Mittelwert der 10-Minuten-Mittel der Luft-Geschwindigkeit des DWD im eigenen Messintervall

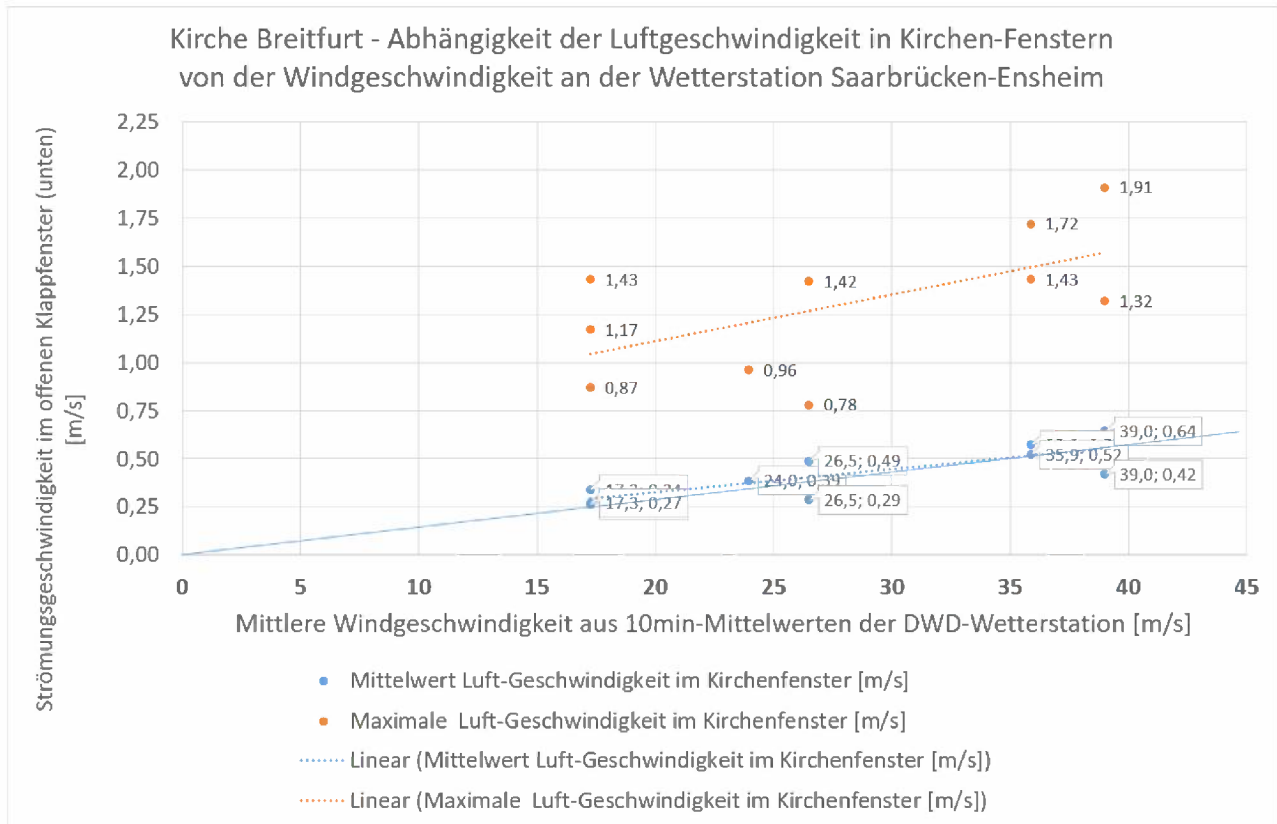
Die Daten des Deutschen Wetterdienstes DWD wurden aus dem Portal Climate Data Center CDC extrahiert (siehe Kapitel [Wetter-Daten des DWD](#)). Folgende Daten der Wetterstation in 66131 Saarbrücken-Ensheim (SDO-ID 4336) wurden verwendet:

- ✓ DWD Climate Data Center (CDC): 10-minütige Stationsmessungen der mittleren Windgeschwindigkeit in ca. 10 m Höhe in m/s für Deutschland, Version v21.3, abgerufen am 28.07.2022 – Produkt_Code: OBS_DEU_PT10M_F
- ✓ DWD Climate Data Center (CDC): 10-minütige Stationsmessungen der maximalen Windspitze in ca. 10 m Höhe in m/s für Deutschland, Version v21.3, abgerufen am 04.08.2022 – Produkt_Code: OBS_DEU_PT10M_F_X
- ✓ DWD Climate Data Center (CDC): 10-minütige Stationsmessungen der mittleren Windrichtung in ca. 10 m Höhe in Grad, Saarbrücken-Ensheim, Version v21.3, abgerufen am 09.08.2022 – Produkt_Code: OBS_DEU_PT10M_D
- ✓ DWD Climate Data Center (CDC): Stündliche Stationsmessungen der Windrichtung in ca. 10 m Höhe in Grad für Deutschland, Version v21.3, abgerufen am 04.08.2022 – Produkt_Code: OBS_DEU_PT1H_DD

Das obige Säulen-Diagramm macht den Unterschied zwischen den lokalen Wind-Geschwindigkeiten in Breitfurt und den Messungen des DWD deutlich. Der Unterschied ist mehr als eine Zehnerpotenz. Verglichen werden hier Wind-Geschwindigkeiten in ungestörter Lage in 10 m Höhe auf dem Flugfeld Saarbrücken-Ensheim mit innerörtlichen Lagen in geringer Höhe.

Die [Umrechnung von Stationsdaten auf die örtliche Windgeschwindigkeit](#) nach [Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)] weicht stark von den beobachteten lokalen Wind-Geschwindigkeiten ab. Die örtlichen Winde sind noch kleiner. Als Parameter für den Rechenansatz sind Rauigkeitshöhen z in der Größe zwischen 100 cm und 1000 cm gewählt. Die gewählten Höhen für die eigenen Messungen liegen innerhalb der Rauigkeitshöhe. Die Formel für das Windgeschwindigkeitsprofil ist **nicht** anwendbar. Um die Durchlüftung des Kirchenraumes mit Wind-Geschwindigkeiten der nächst gelegenen Wetterstation des DWD berechnen zu können, wird eine funktionale Abhängigkeit der Luft-Geschwindigkeit im Fenster mit der Wind-Geschwindigkeit des DWD benötigt.

Aus den Daten des obigen Säulen-Diagramms lässt sich ein funktionaler Zusammenhang erkennen. Nach dem folgenden Diagramm besteht ein lineare Beziehung zwischen der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Fenster und der mittleren Wind-Geschwindigkeit an der DWD-Wetterstation.



Eigener empirischer Zusammenhang der mittleren Geschwindigkeit im geöffneten Klappfenster der Kirche und der mittleren Wind-Geschwindigkeit an der Messstation des DWD in 10m Höhe:

$$w(\text{Fenster}) = n * w(\text{DWD})$$

$w(\text{Fenster})$	Geschwindigkeit in der Fensteröffnung
$w(\text{DWD})$	Geschwindigkeit der Wetterstation
n	0,0154 (Anstieg, 18% Standardabweichung)

Dieser empirische Zusammenhang der mittleren Geschwindigkeit im geöffneten Klappfenster mit der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation zeichnet sich nicht durch den thermischen Gleichgewichts-Zustand von innen und außen aus. Die Raumtemperatur im Saal ist rund 3 bis 7 Grad niedriger als die Temperatur der einströmenden Luft.

Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in geöffneten Fenstern der Kirche

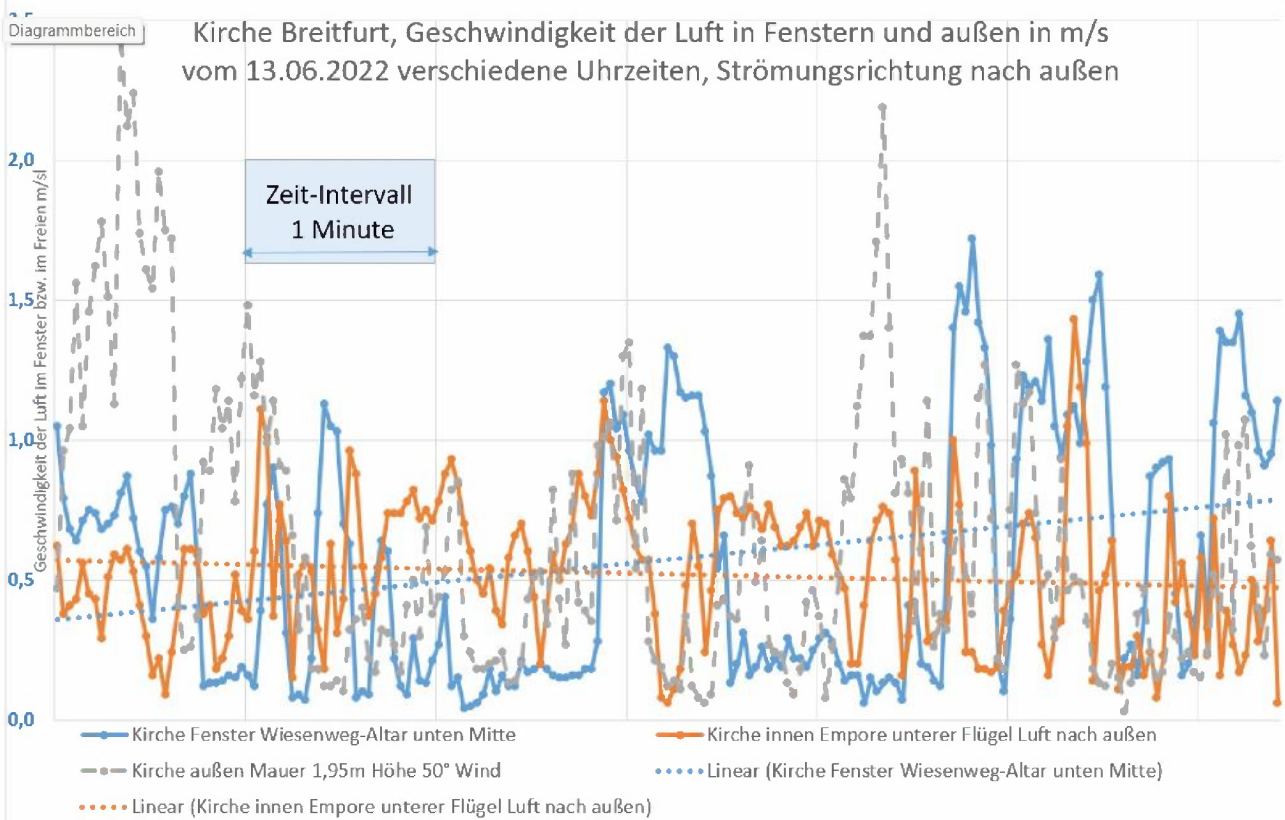
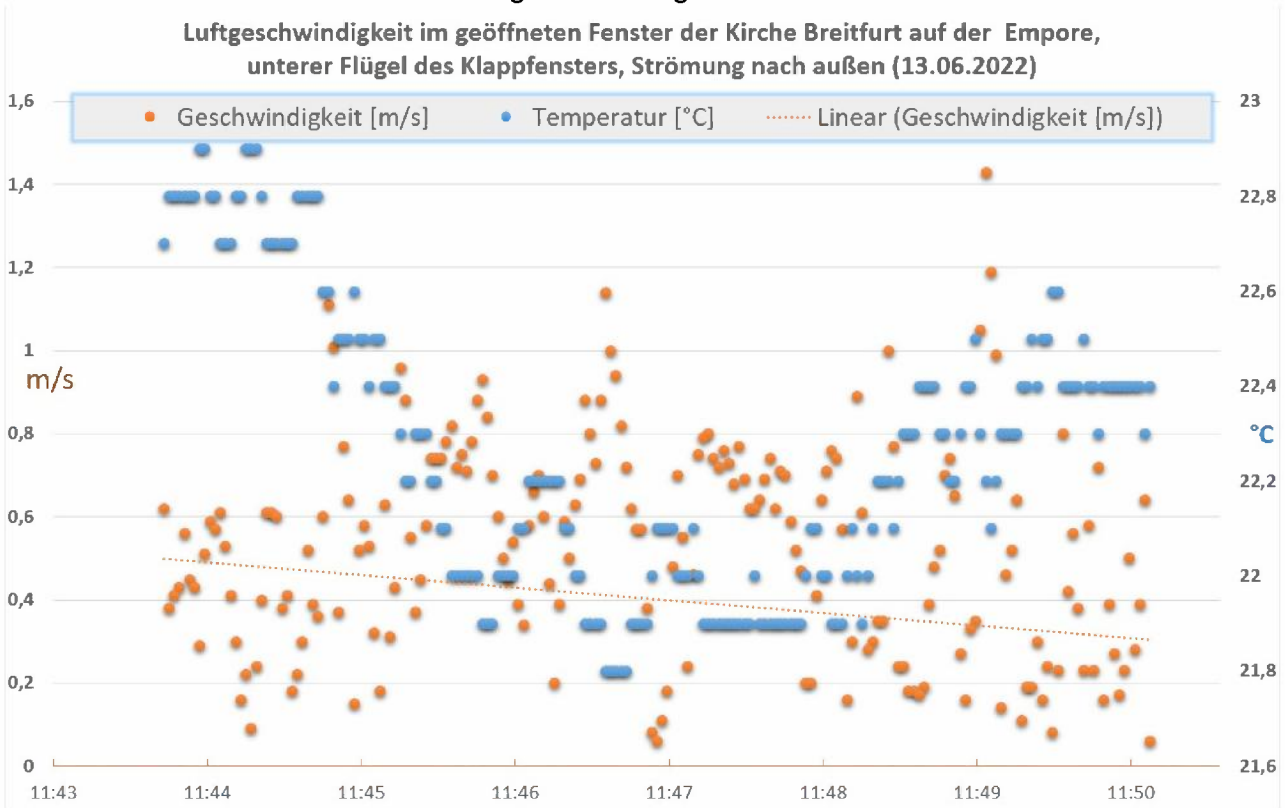


Diagramm überlagerter Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit in den Fenstern und außen an der Kirche – Details im folgenden Diagramm



Das obige Diagramm der Strömungsgeschwindigkeit im geöffneten Kirchenfenster an der Empore zeigt die nicht verdichteten Messwerte im Intervall von zwei Sekunden. Eine starke Fluktuation der Strömungsgeschwindigkeit bewegt sich in schneller Folge zwischen Windstille und Böen. Die Fluktuation von etwa 0,1 bis 0,8 m/s ist erheblich größer als die Messgenauigkeit von 0,1 m/s im Bereich von 0-2 m/s (5% vom Messwert).

Die Trendlinie der Strömungsgeschwindigkeit deutet an, dass das Messintervall von 7 Minuten halbwegs ausreichend gewählt ist. Die 10-Minuten-Mittelwerte der Wind-Geschwindigkeit an der Wetterstation bewegen sich um den Wert von 40 m/s. Zwei 10-Minuten-Mittelwerte an der Wetterstation liegen bei nur 4 m/s.

Auch die Temperatur der Luft schwankt, jedoch nur im Rahmen der Messgenauigkeit von +/- 0,5°C. Die Richtung der Strömung im Fenster war an einem Faden am Anemometer abzulesen.

Aufbereitung der Messdaten des Anemometers:

Messungen der Luft-Geschwindigkeit mit dem Testo-Anemometer werden aus csv-Dateien in EXCEL-Arbeitsmappen umgewandelt:

- X Daten / Aus Tabelle
- X Spalte teilen / nach Anzahl der Zeichen: 16, einmal so weit links wie möglich = Datum und Uhrzeit, aber nur Minuten
- X Spalte teilen / nach Komma / nach äußerstem rechten Zeichen = 2. Spalte Temperatur und 3. Spalte Geschwindigkeit nur die Nachkommastellen
- X 3. Spalte Datentyp von Text in Dezimalzahl wandeln
- X Schließen & Laden
- X Nachbearbeitung Temperatur – Werte als Text gegeben, ganze Zahlen als Dezimalzahl eintragen – Format Zahl
- X in neuer Spalte w die rohe Geschwindigkeit durch 100 teilen.
- X In neuer Spalte Verweis (=) auf Datum und Uhrzeit, dann Tageswert der Zeit
- X Werte und Format exportieren in neue Tabelle. Datum & Uhrzeit: =F4+2/3600/24

Volumenstrom der Lüftung

Die Lüftung erfolgt zum einen durch manuelles Öffnen und Schließen der Fenster nach Gutdünken der Kirchendienerin. Wenn gelüftet wird, sind zwei Klappfenster auf einer Seite geöffnet und eins auf der Gegenseite (Wiesenweg). Die Fläche des Zustroms ist nur $\frac{1}{4}$ der gesamten Fläche der Klappfenster.

Die Durchströmung der Fugen in den Fenstern trägt ebenfalls zum Luftaustausch, sie hängt von den Windverhältnissen ab. Das Kapitel im Anhang [Lüftung durch Fugen](#) beschreibt grundlegendes.

Hier wird aufgrund der eigenen Messungen der Windgeschwindigkeit angenommen, dass näherungsweise die Geschwindigkeit des Windes, der auf die Kirche gerichtet ist, mit der Strömungsgeschwindigkeit der Fensterlüftung übereinstimmt. Die zuvor abgebildeten Diagramme des überlagerten Zeitverlaufs der Luftströmung an verschiedenen Orten zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeit des Windes ähnlich wie die Strömungsgeschwindigkeit im geöffneten Klappfenster ist. Die ermittelte Korrelation von Strömungsgeschwindigkeit der Fensterlüftung mit der Windgeschwindigkeit des DWD wird verwendet, um die Fugenlüftung zu quantifizieren.

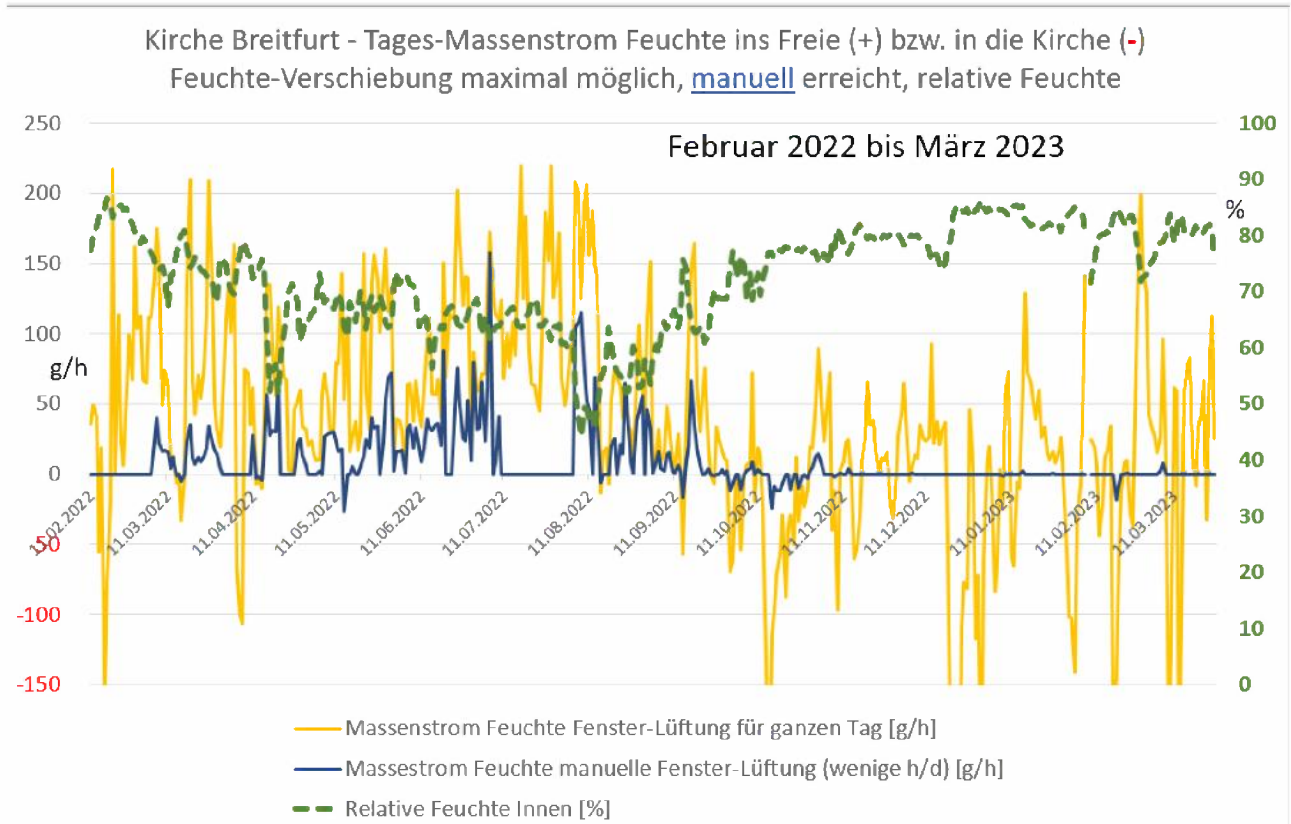
Manuelle Fensterlüftung

Berechnungs-Schritte für Volumenstrom der Luft und Massenstrom der Feuchte aus Tagesmittelwerten für die Dauer eines Jahres

1. Windgeschwindigkeit der benachbarten Wetterstation des DWD in 10 Meter Höhe
2. Mittlere Luftgeschwindigkeit im Klappfenster
– siehe Kapitel „Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster“, eigener empirischer Zusammenhang [m/s]
3. Querschnittsfläche der geöffneten Klappfenster [m²]
4. → mittlerer Volumenstrom der Luft durch die Fenster [m³/h]
5. Differenz der absoluten Feuchte zwischen Innen und Außenbereich [g/m³]
6. → Massenstrom der Verschiebung der Feuchte durch die Fenster bei ständiger Lüftung (Annahme: die Fenster sind den ganzen Tag geöffnet) [g/h]
7. zeitlicher Anteil eines Tages, in dem die Fenster tatsächlich offen waren
8. → Massenstrom der Verschiebung der Feuchte durch die Fenster während der Zeit des Tages, in dem die Fenster offen waren
- Massestrom Feuchte manuelle Fenster-Lüftung (wenige h/d) [g/h]
9. tägliche Masse der ausgetriebenen Feuchte durch die Fenster
- Masse Feuchte Fenster-Lüftung pro Tag [g/d]
[Formuliert als Mittelwert für den ganzen Tag in g/d]

Aus Diagrammen des zeitlichen Verlaufs von ausgetriebener Feuchtemasse und relativer Feuchte im Kirchensaal wird die Wirkung der manuellen Fensterlüftung abgeschätzt.

(Diagramme aus Datei „Tagesdaten.xlsx“)



Die Feb-März 23 manuelle Lüft.

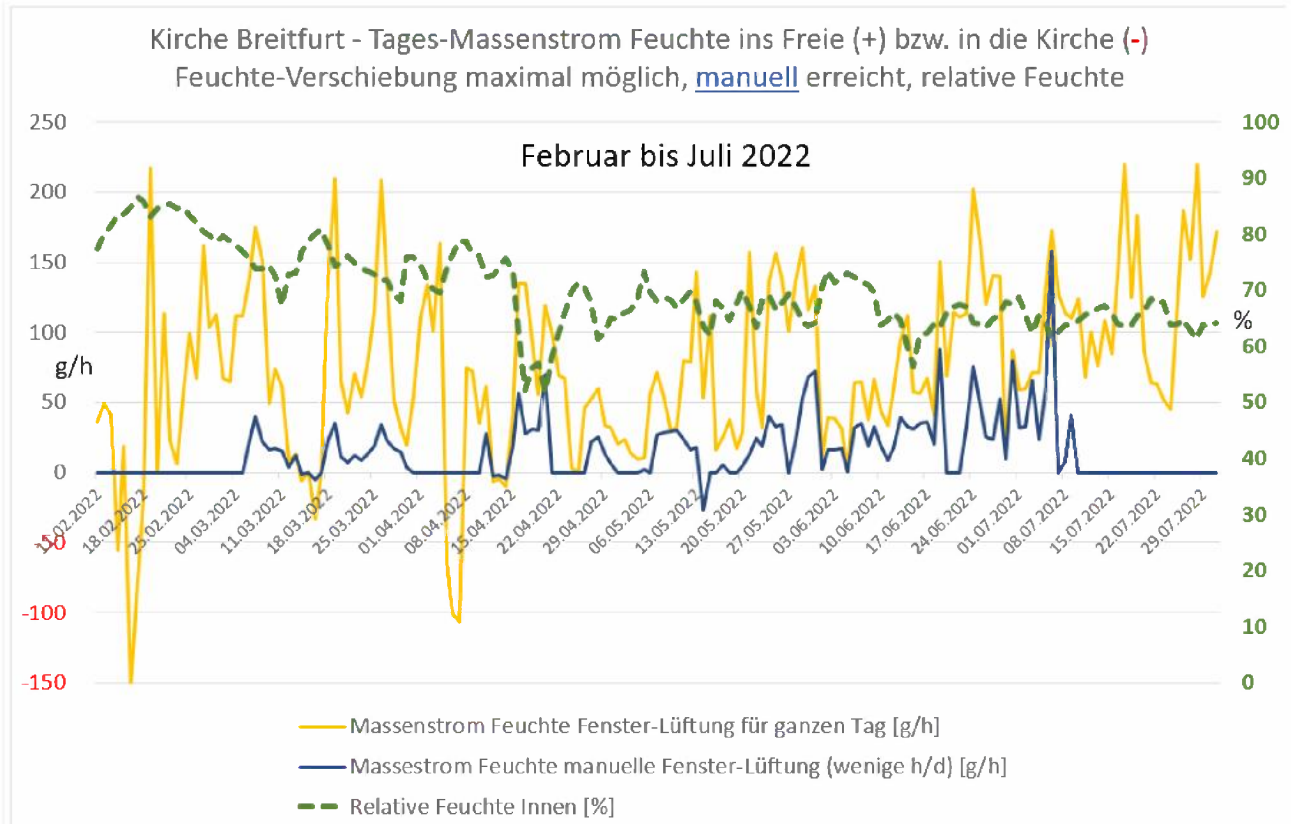
Der Verlauf der relativen Feuchte in der Kirche verringert sich stark in den warmen Monaten. Tageweise sinkt die relative Feuchte fast auf 45%. Im Herbst und Winter liegen die Tagesmittelwerte im Kirchensaal bei 80 bis 90%.

Der Massenstrom von Feuchte, der durch manuelle Lüftung aus der Kirche ausgetragen wird, ist in den Sommermonaten recht hoch – Mittelwert um 20 g/h. Einzelne Tagesmittelwerte erreichen 100 g/h. In den kalten Monaten wird wenig gelüftet. Gelegentlich ist auch ein Eintrag von Feuchte in die Kirche aus den negativen Werten für den Massenstrom abzulesen. Insgesamt wirkt sich die manuelle Lüftung auf die relative Feuchte im Saal in der warmen Jahreszeit wie gewünscht aus.

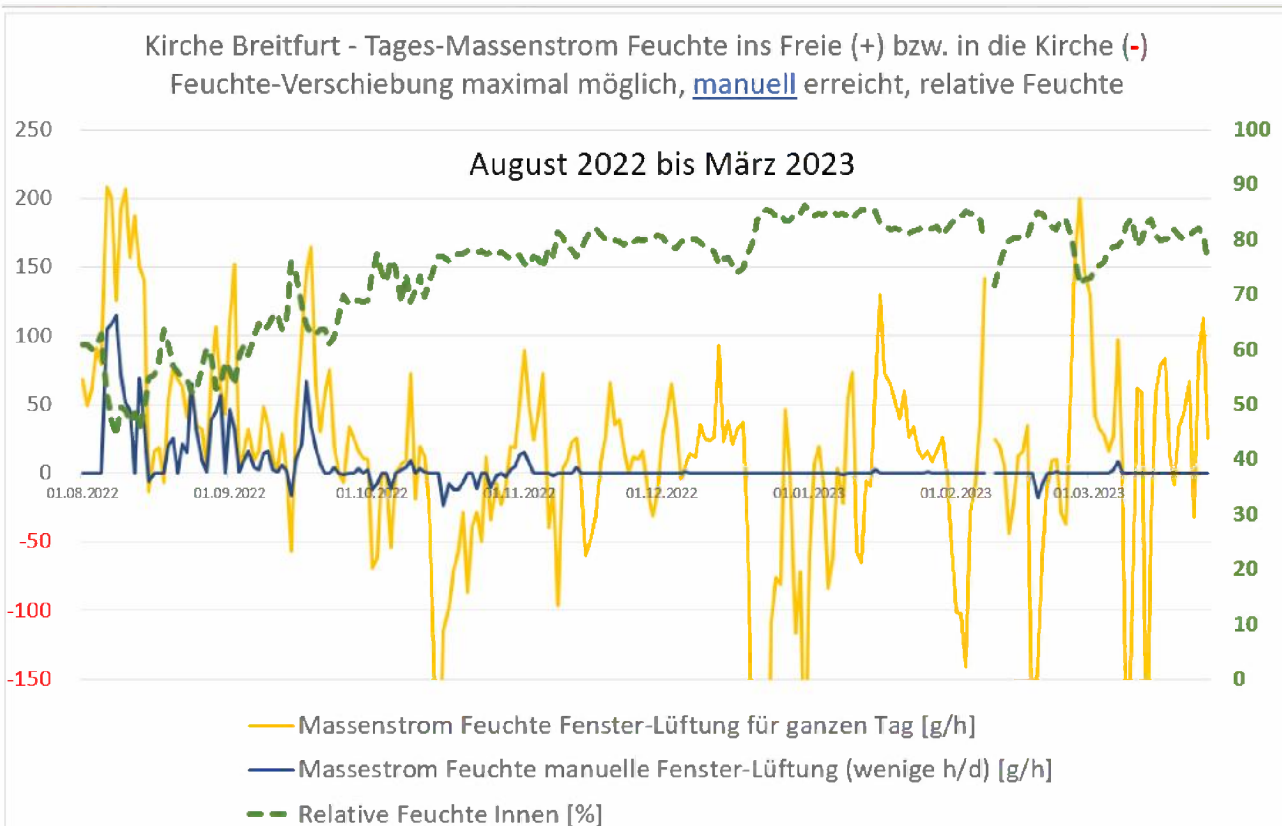
Die Monate von Juni bis August werden als Referenz für das erforderliche Maß des Lüftens angesehen. Denn in diesen Monaten ist die relative Feuchte im gewünschten Rahmen. Monatliche Maxima von 29 g/h im Juni und August.

Wenn die Fenster den ganzen Tag geöffnet gewesen wären, so ergäbe sich ein höherer Massenstrom des Feuchte-Austrags, der gegenüber der manuellen Lüftung um den Zeitanteil offenes Fenster erhöht ist. Dieser maximale Massenstrom für den ganzen Tag überspannt in den warmen Monaten einen Bereich von 20 g/h bis 200 g/h.

In den kalten Monaten treten gehäuft negative Massenströme des Austrags auf. In diesen Werten ist der Zustrom von Luft in den Saal feuchter als der Abstrom. Die Feuchte würde durch unkontrolliertes Lüften eingetragen und der Luftfeuchte weiter erhöht. Gemäß den folgenden Diagrammen ist in der Zeit von April bis September 2022 die Außenluft trockener als die Raumluft. Manuelles Lüften ist ohne Einschränkung möglich.



Dia Feb-Juli 22 manuelle Lüft.



Dia Aug-März 23 manuelle Lüft.

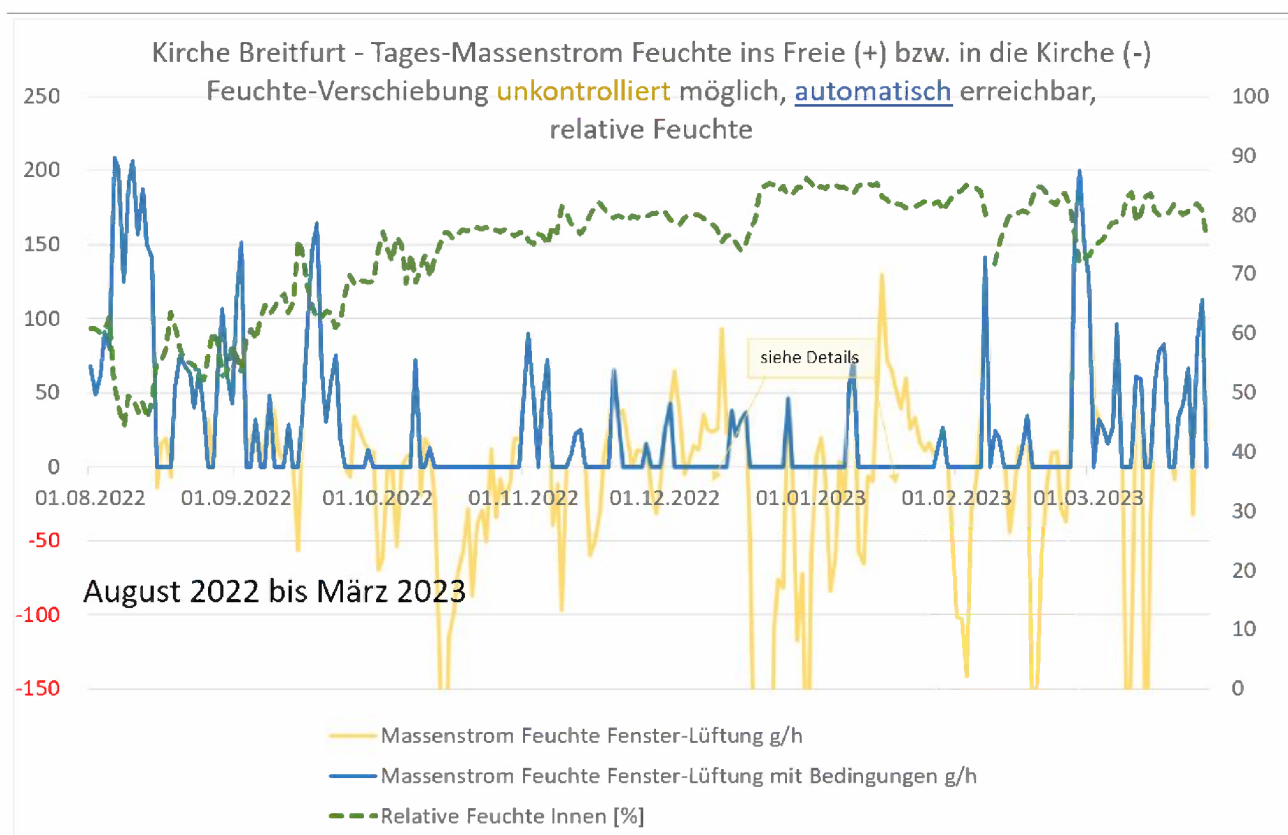
Automatische Fensterlüftung

Berechnungs-Schritte zur Ermittlung des automatisch tageweise erreichbaren Feuchte-Massenstromes durch kontrollierte Lüftung:

Tagesmittelwerte für ein Jahr, insbesondere für die kalte Jahreszeit, gehen in die Rechnung ein. Abweichend zu den Rechenschritten bei der manuellen Öffnung der Fenster wird nicht der zeitliche Anteil eines Tages, in dem die Fenster offen waren, verwendet, sondern es wird für den jeden, ganzen betrachteten Tag überprüft, ob folgende Bedingungen eingehalten sind:

- X Die Dichtedifferenz der Feuchte zwischen Innen und Außen muss den Austrag ermöglichen (Differenz ist positiv).
- X Die Differenz muss zudem den Meßfehler von Temperatur und relativer Feuchte der Automatik übersteigen (10%).
- X Die Temperatur der Außenluft darf eine bestimmte Schwelle nicht unterschreiten, um eine Auskühlung der Kirche in den Frostbereich zu vermeiden (+ 3°C).

Verglichen werden die Feuchte-Massenströme der unkontrollierten Dauer-Lüftung (die Fenster wären ständig offen) mit der automatischen Lüftung unter obigen Bedingungen.



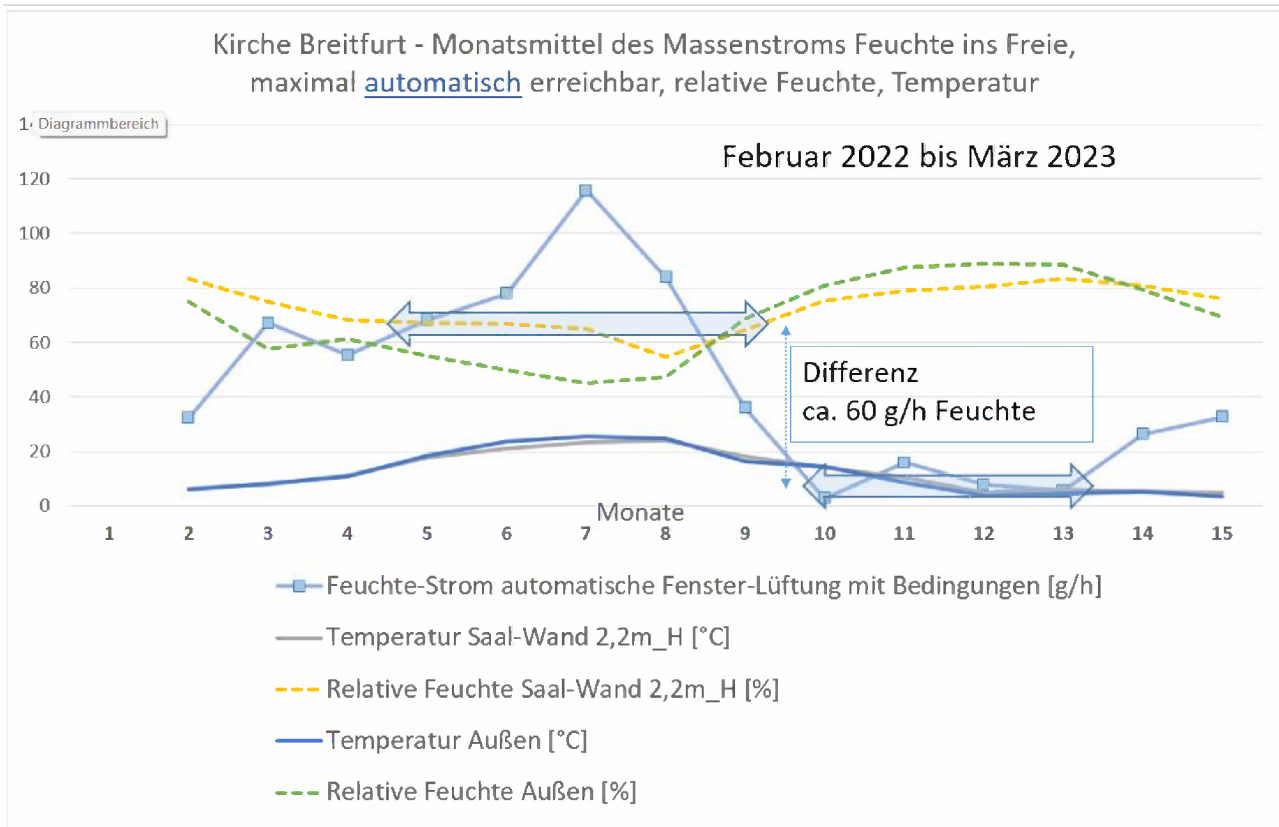
Dia auto. Lüftung 22-23 – Dauer-Lüftung vs. Automatische Lüftung

Obiges Diagramm für die kältere Jahreszeit zeigt den raschen Anstieg der relativen Feuchte im Kirchensaal im September. Zugleich nimmt die Zahl der Tage mit möglichem Massenstrom des Feuchte-Austrags ab – die Anzahl der negativen Massenströme steigt.

In den Monaten Oktober bis Februar bedeutet ein unkontrolliertes Lüften, dass Feuchte verstärkt in die Kirche gebracht wird. Wie die Diagramme zum manuellen Lüften im

vorherigen Kapitel gezeigt haben, fand in dieser Zeit kaum manuelle Lüftung statt.

Ein kontrolliertes, automatisches Lüften kann einen Teil der Feuchte in der Kirche austragen. Um den Beitrag zu quantifizieren, werden die Tageswerte monatlich zusammen gefasst.



Die Monate automat. Fensterlüftung – Basis Tagesmittelwerte

Die Monate von Juni bis August werden als Referenz für das erforderliche Maß des Lüftens angesehen. Denn in diesen Monaten ist die relative Feuchte im gewünschten Rahmen.

Das Diagramm zeigt deutlich das Potenzial des automatischen Feuchte-Austrags in den warmen Monaten. In den warmen Monaten könnte eine automatische Lüftung einen Massenstrom von etwa 70 g/h Austrag der Feuchte erreichen und die manuelle Lüftung mit monatlichen Maxima von 29 g/h übertreffen.

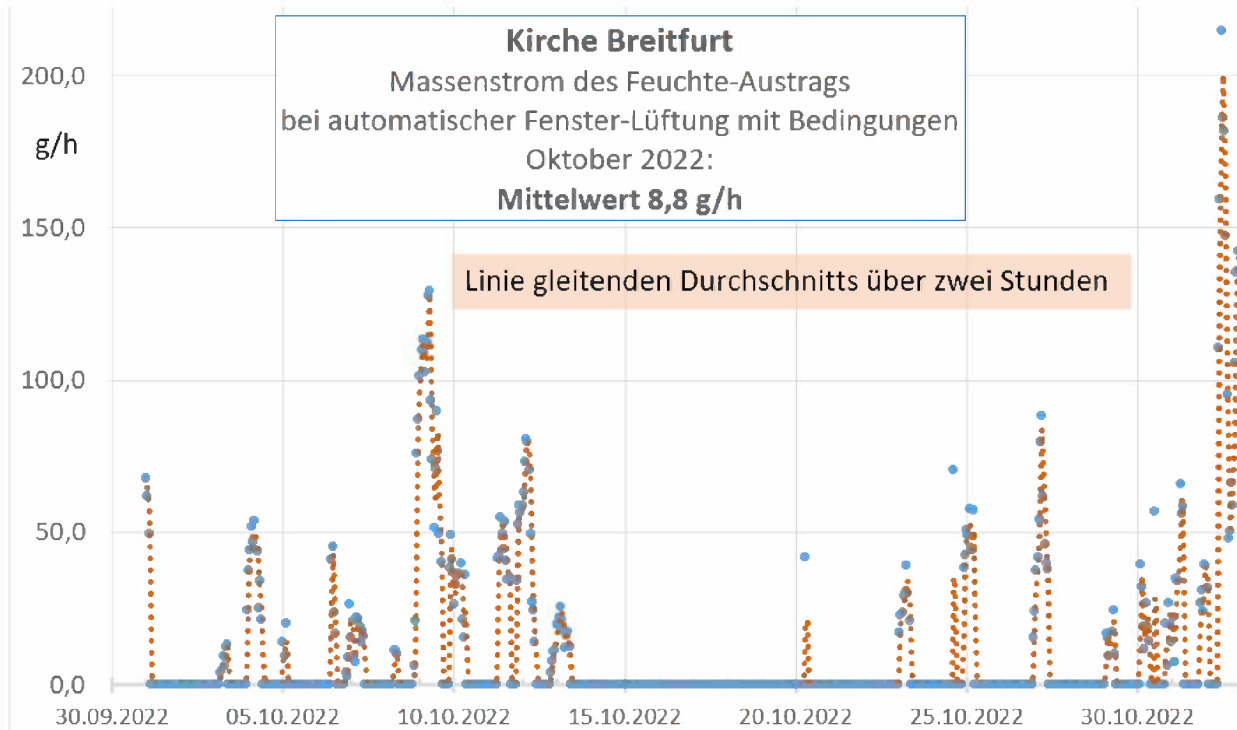
In den kalten Monaten ist der Austrag von Feuchte durch eine automatische Lüftung deutlich eingeschränkt. Die Trocknung der Kirche ist fraglich.

Diese Befunde beruhen auf Tagesmittelwerten, die aus Messwerten von 15-Minuten-Intervallen verdichtet sind. Die Bedingungen für die automatische Lüftung richten sich ebenfalls nach dem Tagesmittelwert.

Die obigen Diagramme des Feuchte-Austrags zeigen in den kalten Monaten im schnellen Wechsel Austrag und Eintrag von Feuchte. Daher ist noch zu untersuchen, ob nicht stundenweise die Bedingungen zur freien Lüftung erfüllt sind und damit insgesamt mehr Feuchte ausgetragen werden kann.

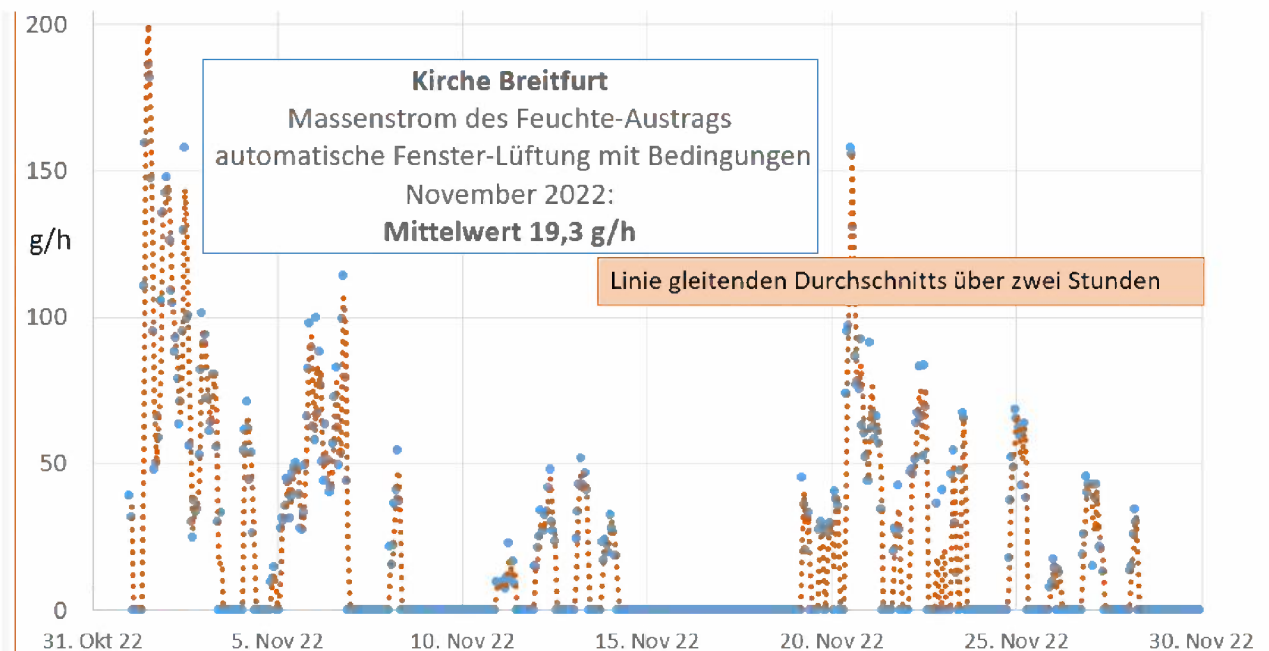
Die folgende Überprüfung verdichtet die Daten der eigenen Messungen aus den 15-

Minuten-Intervallen zu Stundenmittelwerten. Verwendet werden auch Stundenwerte des DWD zur Windgeschwindigkeit.



Lüftung 1h-Mittel.xlsx - Dia FeuchteAustrag 1h-Basis Okt

Dieses Diagramm ist auf der Basis von Stundenmittelwerten erstellt. Berücksichtigt sind zwei Bedingungen für jeden Tag. Die automatische Lüftung öffnet die Fenster nur dann, wenn die absolute Feuchte außen mindestens um den Meßfehler von 5 % kleiner ist als die Innenfeuchte (überlagerte Fehlerspannen Feuchte und Temperatur). Sie öffnet nur dann, wenn die tägliche Außentemperatur 3°C nicht unterschreitet.



Dia FeuchteAustrag 1h-Basis Nov

Die Diagramme für Oktober und November 2022 zeigen, dass oft nur wenige Stunden am Tag die Bedingungen für das Öffnen der Fenster gegeben sind.

Eine Abschätzung des Feuchte-Austrags in den kalten Monaten soll daher nicht tageweise durchgeführt werden, sondern muss auf Basis von Stundenwerten vorgehen.

In folgender Tabelle ist der errechnete Feuchte-Austrag auf der Basis von Tagesmittelwerten und auf der Basis von Stundenmittelwerten einander gegenüber gestellt. Die übrigen Daten beruhen auf Tagesmittelwerten.

Monat (ab 1- 2022)	Feuchte-Austrag automatische Fenster- Lüftung mit Bedingungen [g/h]		Tempe- ratur Saal- Wand 2,2m_H [°C]	Relative Feuchte Saal- Wand 2,2m_H [%]	Tempe- ratur Außen [°C]	Relative Feuchte Außen [%]	Anzahl der Tage im Monat: Bedingungen für Offen ganztägig nicht erfüllt
	(Tages- Basis)	(Stunden- Basis)					
1							
2	32,2		6,29	83,2	6,18	75,0	9
3	67,0		7,90	75,0	8,20	57,7	8
4	55,3		11,16	68,4	10,93	61,3	9
5	68,1		17,69	67,2	18,67	55,0	7
6	77,9		21,22	66,6	23,53	49,9	2
7	115,6		23,15	64,9	25,69	45,2	0
8	83,8		24,14	54,7	24,67	47,3	6
9	35,9		18,32	64,7	16,43	68,7	15
10	2,7	8,7	14,27	75,2	14,56	80,6	29
11	15,9	19,3	10,35	78,9	8,66	87,6	19
12	7,8	11,1	4,74	80,3	3,73	89,0	24
13	5,5	25,9	6,13	83,3	4,62	88,5	27
14	26,3	28,3	5,38	80,8	5,21	79,4	20
15	32,5		4,78	75,9	3,51	69,4	10

Monatsübersicht auto. Lüft.

Ergebnis:

In den kalten Monaten kann eine kontrollierte, automatische Lüftung einen signifikanten Beitrag zum Feuchte-Austrag leisten. Die Ergebnisse aus Stundenmittelwerten übertreffen diejenigen aus Tagesdaten zum Teil erheblich.

In vielen, kalten Monaten könnte ein Massenstrom von Feuchte ausgetragen werden, der im Mittel zwischen 10 g/h und 30 g/h liegt.

Ein Grund dafür dürften die raschen Wetterwechsel innerhalb von Stunden sein. Auch eine erhöhte Windgeschwindigkeit tritt in den kalten Monaten auf.

Im Kapitel über manuelle Lüftung zeigt das Diagramm „Dia Feb-Juli 22 manuelle Lüft.“ einen mittleren Feuchte-Austrag von 17 g/h im Mai, 28 g/h im Juni und 29 g/h im August.

Die Größenordnung des Feuchte-Austrags durch manuelle Lüftung ist zugleich als das Maß zu verstehen, dass für eine dauerhafte Reduktion der relativen Feuchte auf unter 70% erforderlich ist.

Im letzten Quartal des Jahres 2022 hätte die automatische Fenster-Lüftung im Mittel 13 g/h Feuchte ausgetrieben. In den Referenzmonaten des Sommers beträgt das Mittel des manuellen Feuchte-Austrags 24 g/h.

Dieser große Unterschied lässt den Schluss zu:

Die automatische Fenster-Lüftung in der Kirche wäre nicht in der Lage gewesen, die relative Feuchte auf 70% im vierten Quartal 2022 abzusenken.

Eine vertiefende Analyse folgt im Kapitel „Bilanz der Feuchte in der Kirche“.

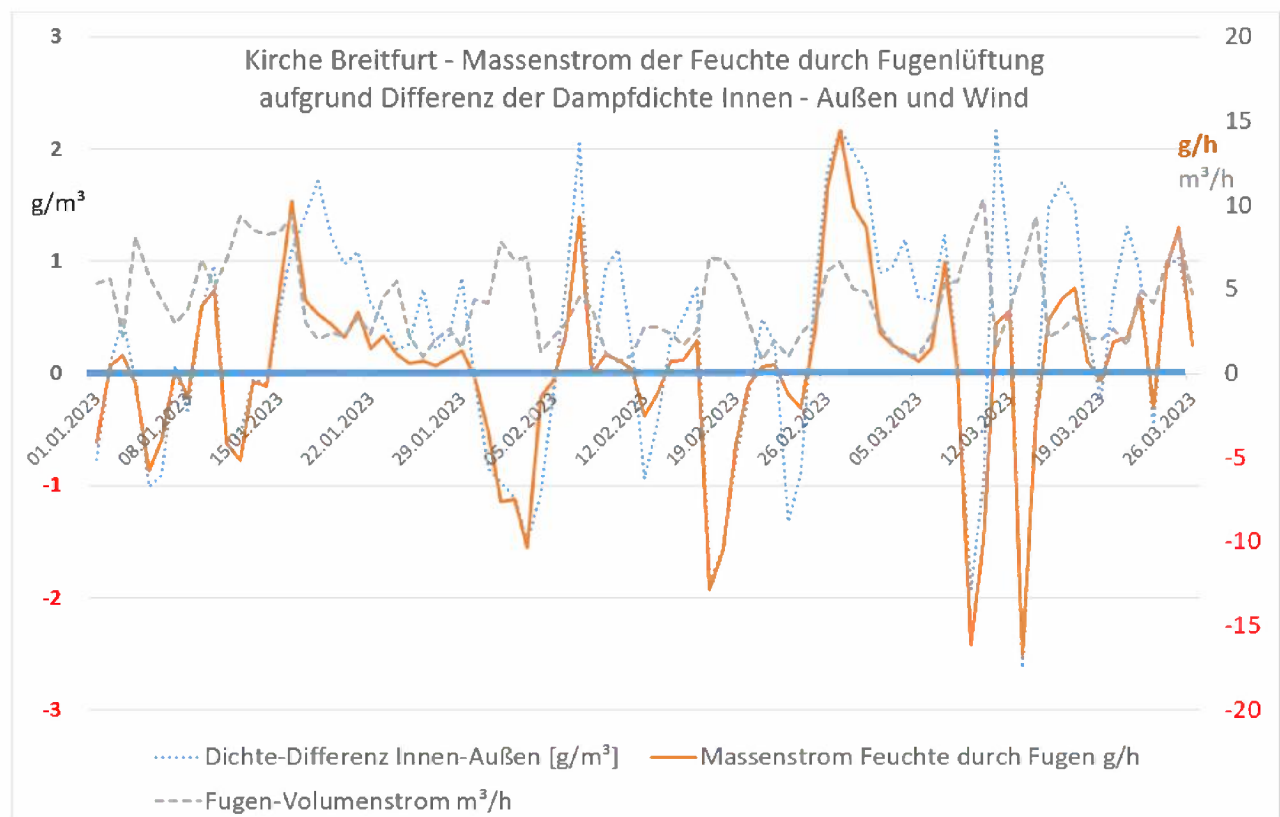
Fugenlüftung

Im Kapitel „Lüftung durch Fugen“ im Anhang sind die Grundlagen der Berechnung des Beitrags der freien Lüftung durch Baufugen und gewählte Parameter zusammen gestellt.

Berechnungs-Schritte für Volumenstrom der Luft und Massenstrom der Feuchte aus Tagesmittelwerten für die Dauer eines Jahres

1. Windgeschwindigkeit der benachbarten Wetterstation des DWD in 10 Meter Höhe
2. Mittlere Windgeschwindigkeit senkrecht auf das Kirchengebäude – wird identisch gesetzt mit der Luftgeschwindigkeit im Klappfenster
– siehe Kapitel „Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster“, eigener empirischer Zusammenhang [m/s]
3. Differenzdruck über das Gebäude, errechnet aus der Windgeschwindigkeit senkrecht auf das Kirchengebäude [Pa]
4. Daten der Fensterfugen – Längen und Durchlässigkeit
5. → mittlerer Volumenstrom der Luft durch die Fenster [m³/h]
6. Differenz der absoluten Feuchte zwischen Innen und Außenbereich [g/m³]
7. → Massenstrom der Verschiebung der Feuchte durch die Fensterfugen [g/h]

Aus Diagrammen des zeitlichen Verlaufs von ausgetriebener Feuchtemasse und relativer Feuchte im Kirchensaal wird die Wirkung der manuellen Fensterlüftung abgeschätzt.



Dia Fugenlüftung Jan-März 2023

Die unkontrollierte Lüftung durch Fugen wird in der Feuchte-Bilanz (s. u.) berücksichtigt.

19.04.2023 – ergänzt 23.08.2023

Abmessungen der Fenster und des Saals

Kirchensaal Breite außen 8,50 m Länge außen 20,70 m
 Breite innen 7,00 m Länge innen ca.19 m

Kirche Breilfurt	[Meter]	[Meter]	[Meter]
	vorn, Altar, Bank 13	hinten, 1. Bank	Im Bereich der Kanzel
Breite Parkettboden, links	2,84	2,89	
Breite Parkettboden, rechts	2,96	2,92	
Breite Mittelgang	1,13	1,36	
Breite des Saals	6,93	7,17	6,89
Länge Parkettboden	11,3		
Länge Stufe bis Saal Parkett	2,79		
Länge Altarbereich	4,86		
Gesamte Länge Innen	18,95		
Bodenfläche innen, Parkett	65,60	m ²	
Bodenfläche Saal, Stein	47,55	m ²	
Bodenfläche Trakt Eingang	20,00	m ²	
Bodenfläche innen	133,15	m²	
Höhe des Raumes innen	5,45		
Volumen der Innenräume	726	m³	

In Längsachse gemessen Länge Vorraum 1,80 m
 Länge Parkettboden 11,30 m
 Länge Altarbereich 5,48 m

Volumen der Kirche, innen 726 m³

Grundriss der Kirche mit Messstellen für Feuchtigkeit und Temperatur: siehe Kapitel „Aufgabenstellung zur Untersuchung der hohen Luftfeuchte“

Die Abmessungen der Glasflächen und Öffnungsquerschnitt der Klappfenster sind vor Ort aufgenommen:

Bauteil	Abmessungen	Höhe [m]	Breite [m]	Fläche je Fenster [m ²]	Länge Fugen je Fenster [m]	Gesamtes Gebäude [m ²] bzw. [m]
Kirchenfenster	8 Stück, Höhe bis Scheitel 3,2m, 0,95m	3,20	0,95	3,04		24,32 m ²
	UK Fenster über Fußboden, innen	1,55	eigene Messung			
	UK Laibung über Fußboden, innen	1,32	eigene Messung			
	UK Fenster über Boden, außen	1,71	eigene Messung			
	Höhe Drehachse Fenster, außen	4,07	berechnet			
	OK Fenster bis UK Decke	0,70	laut Bauplan			
Farbige Glasscheiben	Einzeilscheibe 15cm Höhe, 11cm Breite. (freie Glasfläche)	0,15	0,11	0,02		
	Modul, je 16 Scheiben, in Blei gefasst (äußere Glaskanten)	0,64	0,44			
	Modul von Stahlrahmen gehalten			0,26		
Eisenwerk	Rahmenkreuz, trägt die Module		0,04	0,24		
Klappfenster	4 Flügel in Größe eines Modul. Horizontale Drehachse des Flügels leicht oberhalb Mitte (31,8cm, 53% der Höhe). Oberer Teil des Flügels dreht nach innen, der untere nach außen.	0,59	0,41	0,24	2,00 m	0,97 m ²
	Untere Fläche Flügel in Glas-Ebene			0,13		
	Hydraulischer Durchmesser Flügel unt.	0,69	= (4*A/U)			
Fenster-Front mit farbigen Glasscheiben	Länge der Fugen der Festverglasung (Blei, Stahl, Putz), abzüglich Fugen Klappfenster				35,35 m	282,77 m
	Fugen der Klappfenster				2,00 m	8,02 m
Portal	Massive, zweiflügelige Holztür	2,50	1,13	2,83	7,26 m	2,83 m ²

Fenster der Kirche Breitfurt

Bilanz der Feuchte der Kirche

Um die jahreszeitlichen Trends der Luftfeuchtigkeit im Kirchensaal zu verstehen, sollen die Stoffströme von Wasserdampf über die äußere Hülle der Kirche bilanziert werden. Ein Modell des Wasserhaushalts in der Kirche soll die Quellen der Feuchtigkeit, alle Transportvorgänge und die Speicherung der Feuchtigkeit quantitativ darstellen. Das zu erstellende Modell basiert sowohl auf Messungen in der Kirche und auf Berechnungen der Transportvorgänge. Das Modell bildet ab:

- Quellen für den Eintrag von Feuchtigkeit in den Kirchenraum können die Besucher, der Fußboden, die Fundamentmauern und Schlagregen an undichten Fenstern sein.
- Die wesentlichen Transportvorgänge von Wasserdampf aus der Kirche heraus und herein umfassen die natürliche Lüftung über Fugen der blei-verglasten Fenster, der Eingangstür und Baufugen im Bereich vornehmlich der Dachdecke. Dazu zählt noch die frei von der Kirchendienerin durchgeführte Lüftung über die Klappfenster.
- Speicherung von Feuchte wäre in den Einbauten aus Holz (Bänke, Fußboden) und in den oberflächen-nahen Schichten der Wände zu berücksichtigen.

Die Bilanz lautet

Wasserdampf-Strom hinein - Wasserdampf-Strom heraus = Speicherung

Folgende Massenströme von Wasserdampf werden modellhaft aus den Messdaten mit Ingenieurs-Methoden abgeschätzt:

- Wasserdampf-Strom von Personen als Quelle der Feuchtigkeit
– Wasserdampf-Strom hinein als Quellenstrom
- Wasserdampf-Strom aus dem Fußboden in die Raumluft – Quellenstrom
- Wasserdampf-Strom der Fensterlüftung – Wind-induziert durch das Gebäude
siehe vorherige Kapitel
- Wasserdampf-Strom der Strömung durch Baufugen – Wind (siehe oben)
- zeitliche Änderung der Speicherung von Feuchte in den Baustoffen der Kirche.

Personen als Quelle der Feuchtigkeit

[Zürcher 2018] berichtet die Wasserabgabe von Personen bei verschiedenen Tätigkeiten:

- X Personen bei leichter Arbeit 30-60 g/h
- X Personen bei schwerer Arbeit 100-200 g/h

Als Quellstärke für die Besucher von Gottesdiensten oder Konzerten wird hier eine Wasserabgabe von 50 g/h angenommen. Die Dauer einer Veranstaltung beträgt pauschal auf eine Stunde. Also wird bei einer durchschnittlich besuchten Veranstaltung eine Wassermenge von etwa 1 kg in den Kirchenraum eingetragen. An besonderen kirchlichen Feiertagen und bei Konzerten kann mit rund 100 Besuchern und einer Dauer von 1,5 Stunden gerechnet werden – dies ergibt einen Eintrag von 7,5 kg Wasser.

Der gemittelte Massenstrom der Feuchte von Personen beträgt aus zweimal 1 kg im Monatsmittel **normalerweise 2,7 g/h** und im **Dezember 4,7 g/h**.

Fußboden als Quelle der Feuchtigkeit

Der Fußboden der Kirche ist mit Zwischenschichten auf dem Erdboden aufgebaut. Das Gelände ist in einer Flussaue – von einem hohen Grundwasserstand wird ausgegangen. Ob eine Sperrschicht eingebaut ist, ist nicht bekannt – vermutlich wurde erst nach dem Zweiten Weltkrieg im Kirchensaal ein Parkettboden auf einer Beton- oder Estrichschicht eingebaut (eine alte Bohrung im Parkett lässt eine mineralisch gebundene Oberfläche und ein Kabel erkennen).

Der Parkettboden befindet sich im Bereich der Kirchenbänke im Saal. Zwischen den Kirchenbänken verläuft ein Mittelgang zum Altarbereich, der mit einem harten Kalkstein belegt ist (Abschnitt: Beschreibung der Bausubstanz – Fußboden).

Der Kalkstein-Belag weist an den Rändern zum Parkettboden Abplatzungen und weißlichen Belag auf den abgeplatzten Stellen auf. Dies kann auf hohe Feuchtigkeit im Boden deuten.

Eine rechnerische Abschätzung des Quellenstroms kann von verschiedenen Modellen des Stofftransports ausgehen:

- DIN 4108-3:2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, ... – Diffusion durch Baustoff-Schichten
- Brauer, Heinz; Mewes, Dieter (1971): Stoffaustausch – Stoffübergang in der Grenzschicht zwischen Luft und Oberfläche

Allen Modellen ist gemeinsam, dass stationäre Zustände der Transport-Vorgänge vorausgesetzt werden.

Die beobachteten periodischen, täglichen Änderungen der Zustandsgrößen Temperatur und Feuchtigkeit werden daher mit Mittelwerten beschrieben.

Gemessen werden Zustandsgrößen als momentane Werte der Temperatur und der Feuchtigkeit im 15-Minuten-Intervall. Vereinfachend wird für die Bilanzierung der Tag als Bezugszeitrahmen gewählt.

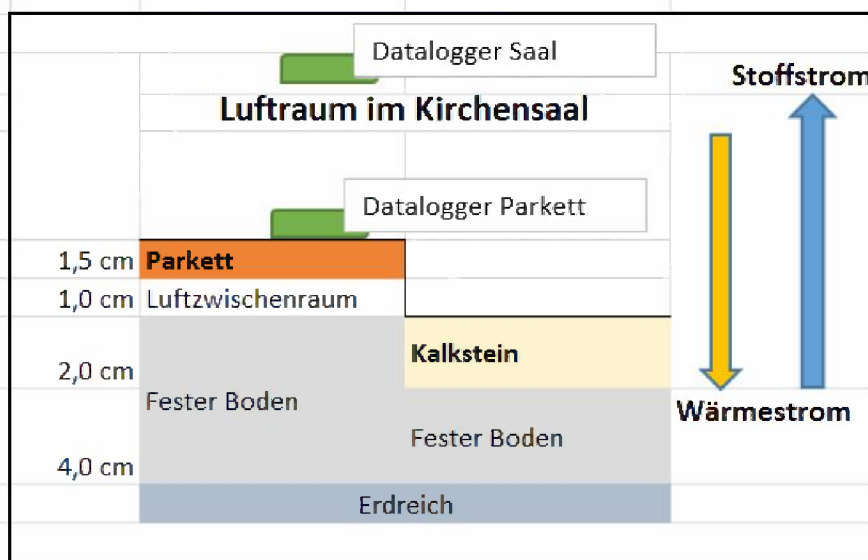
Die Meßstellen befinden sich in der Grenzschicht zwischen Luft und Oberfläche – und zwar im Kernbereich der Luft im Saal und zum anderen auf der Oberfläche des Parkettbodens. Auf dem Parkettboden ist seit Mai 2022 ein Datalogger installiert, der eine geringe Bauhöhe von ca. 6 mm hat. Dessen Messwerte sollen die Werte der Oberfläche des Parkettbodens repräsentieren, weil die Grenzschicht des Wärmeübergangs zwischen Luft und Wand etwa 20 cm nach eigenen Erfahrungen und Abschätzungen beträgt.

DIN 4108-3:2001-07 kann zur Berechnung der Diffusion durch Baustoff-Schichten herangezogen werden, wenn Temperatur und Feuchte an der Oberfläche und unter der untersten Schicht des Bodenaufbaus bekannt sind.

Die Daten der Oberfläche des Fußbodens werden durch Messwerte eines Dataloggers repräsentiert.

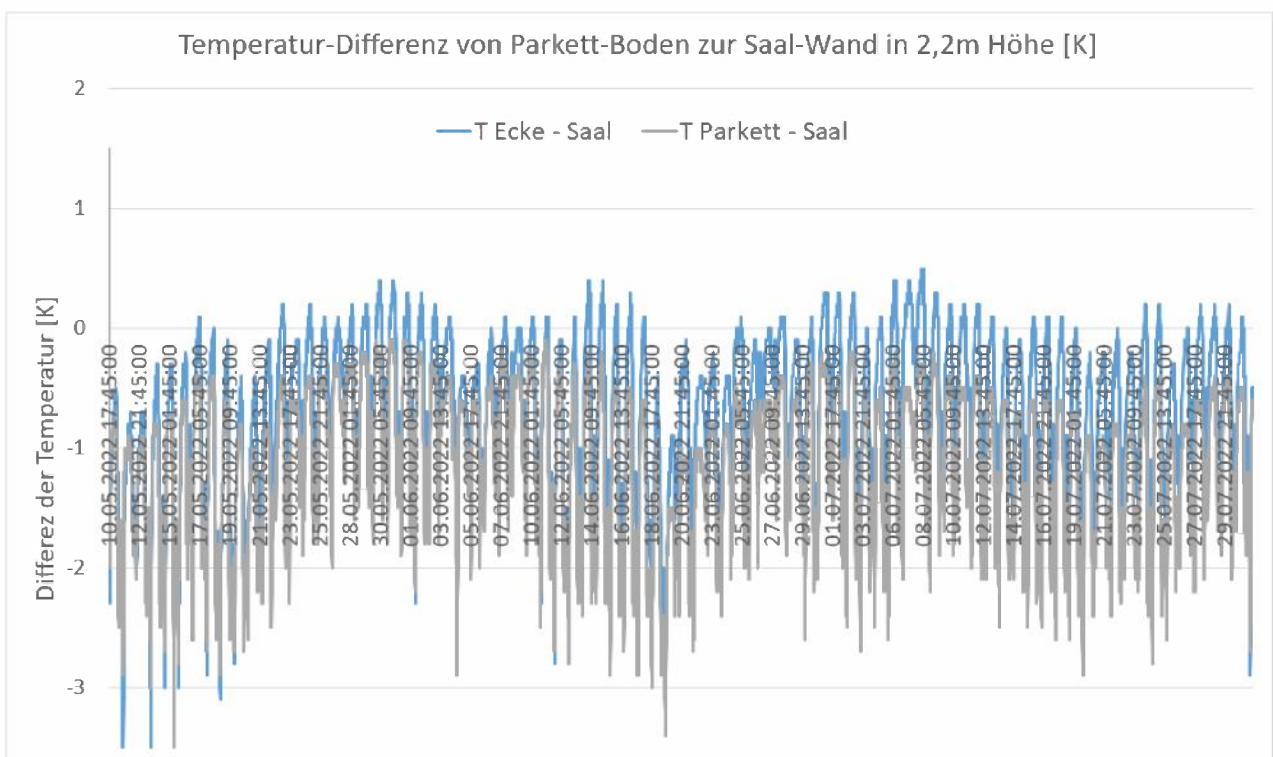
Für die unterste Schicht des Bodenaufbaus wird Sättigung bei der Temperatur der Oberfläche angenommen. (Aus den gemessenen Temperaturen der luftseitigen Grenzschicht könnte zwar der Wärmestrom errechnet werden und damit das Temperatur-Gefälle in den Baustoff-Schichten, aber dies scheint für die Abschätzung nicht relevant zu sein.)

Folgende Skizze beschreibt den Aufbau des Bodens und die Lage der Meßstellen:



[Stofftransports.xlsx] Skizze Fußboden Stofftransport, Sommer

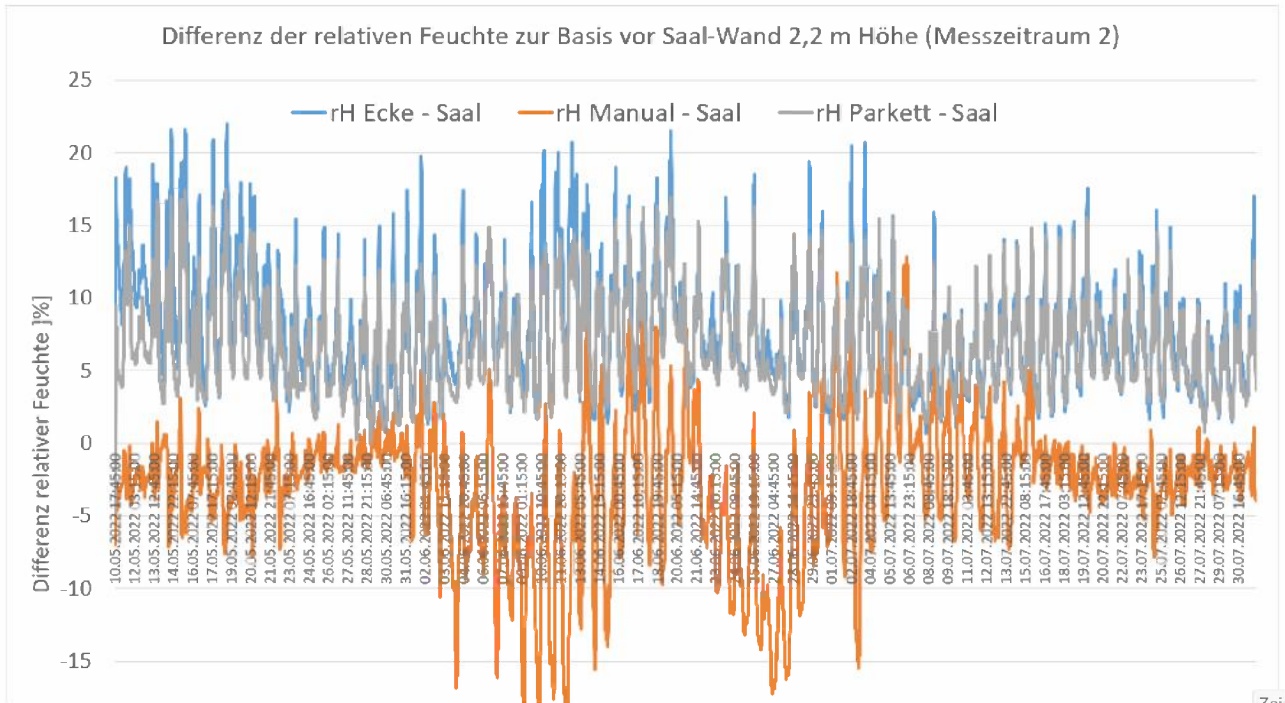
Meßwerte am Boden



Entsprechend den Modellen des Transports von Wasserdampf aus dem Boden werden die Zustände über mehrere Monate untersucht. Wesentlich sind die Differenz der Temperatur zwischen Luftraum und der Oberfläche des Fußbodens. Zum Vergleich dient die Differenz der Temperatur im Luftraum zur Temperatur an der Ecke des Saals in niedriger Höhe über dem Boden. Mess-2.xlsx [Diagramm2 T-Differenz Mess2]

Im Diagramm über die Periode vom 10.05.2022 bis 31.07.2022 ist die Temperatur in der Nähe der Saalwand (2,2 m Höhe) stets höher als die Temperatur des Fußbodens. Die Differenz überstreicht den Bereich von 0,2 K bis 3 K. Wärme fließt in den Boden.

Umgekehrt verhält sich die relative Feuchte. Sie ist am Boden höher als im Kern der Raumluf. Die Differenz der relativen Feuchte von Parkettboden zu Raumluf überstreicht einen Bereich von etwa 2% bis 17%.
Feuchtigkeit aus dem Boden (Parkett und Stein) strömt in die Raumluf.



Mess-2.xlsx [Diagramm1 rH-Differenz Mess2]

Wärmeübergang und Stoffübergang sind hier offensichtlich gekoppelt.

Berechnung Stoffdurchgang Massenstrom

Der Stoffdurchgang beschreibt die Fluss der Feuchte durch die Schichten des Bodenaufbaus. Die täglichen Schwankungen der Zustandsgrößen sollen für die Analyse des Innenraum-Klimas außer Betracht gelassen. Die Zeitbasis der Vorgänge könnten Tage oder Monate des Jahres sein.

[DIN 4108-3] geht von einer Tauperiode von 1.440 Stunden pro Jahr für die Kondensation von Wasser in Bauteilen aus und für die Verdunstungsperiode von 2.160 Stunden. Eine monatliche Zeitbasis wird in [DIN EN ISO 13788] gewählt. Die Monatsbilanz ist bei Berechnungen zum Wärmeschutz nach der Energie-Einspar-Verordnung und dem sie ersetzenden Gebäudeenergiegesetz als Standard eingeführt.

Im Kapitel „Berechnungsmethoden zum Wassertransport durch Diffusion“ werden die Grundlagen zum Wasserdampf-Diffusion nach [DIN 4108-3] Anhang A zitiert. Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g berechnet sich:

$$g = \Delta p / Z \quad [\text{kg} / (\text{m}^2 * \text{h})]$$

Δp Differenz des Wasserdampfdrucks [Pa] über alle Schichten des Bauteils

Z Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand [$\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa} / \text{kg}$]

$$Z = 1,5 * 10^{-6} * (\mu_1 * s_1 + \dots + \mu_n * s_n) \text{ für alle Schichten } 1 \dots n$$

$$= 1,5 * 10^{-6} * \sum s_d$$

s_d wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]

μ Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-] nach DIN 4108-4 usw.

s geometrische Schichtdicke [m]

Der Größe Z liegt zugrunde der Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient von Luft bezogen auf den Dampfteildruck $\delta_0 = D / (R_D * T) = 2 * 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 * \text{s} * \text{Pa})$.

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke für den Parkettboden entspricht:

Angenommene Schichten - Parkettboden	s [m]	μ Minimal	$\mu * s$ [m]
(WUFI-Wert) Eiche radial	0,015	140	2,1
Luftschicht 5-25mm, EN ISO 6946 Tabelle 2	0,015	1	0,02
Normalmörtel	0,040	1	0,04
Lose Schüttung, abgedeckt: Sand, Kies	0,300	4	1,2
		s_d	3,4

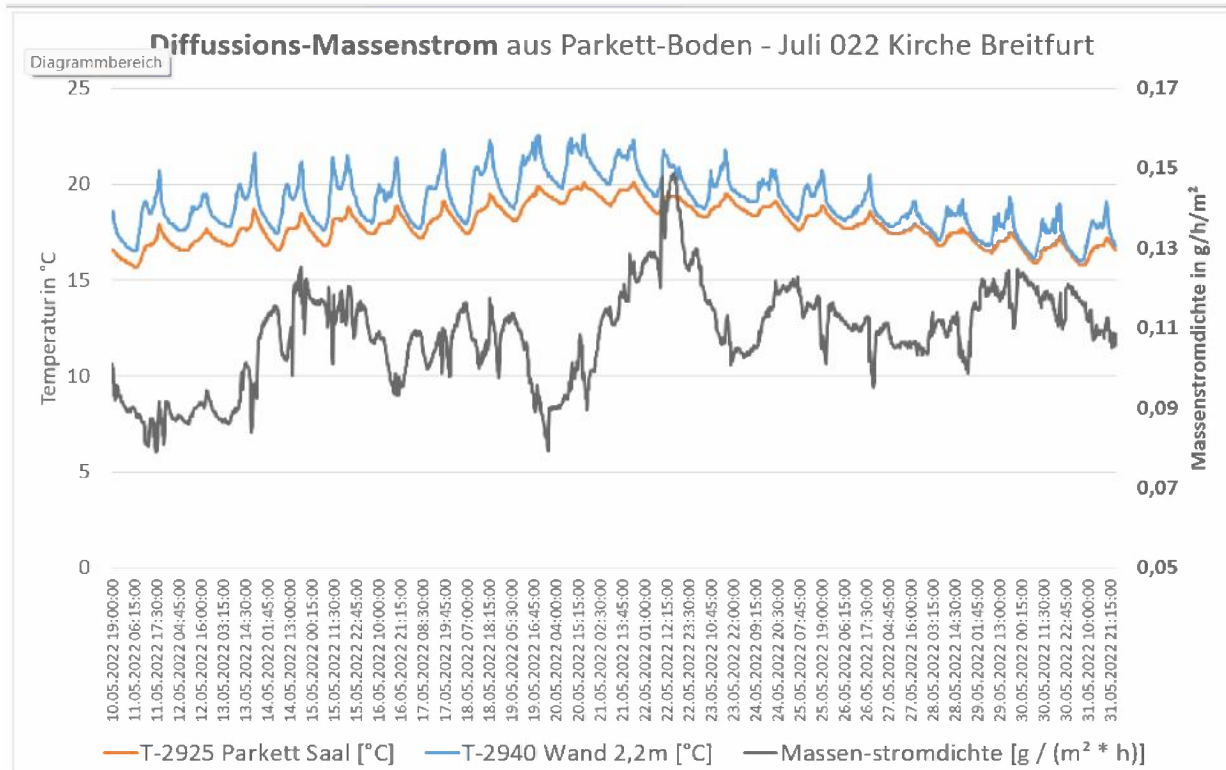
Die Temperatur der Oberfläche des Parkettbodens ist im Juli 2022 (10.5.-31.5.) 17,9°C (Standardabweichung 1,0K).

Der Mittelwert der relativen Feuchte ist dort 73,35%, in der Raumluft 66,70%.

Mit 100% Feuchte an der unteren Schicht bei konstanter Temperatur von 17,9°C ist der Dampfteildruck unten 2052 Pa und an der Oberfläche 1505 Pa. Die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g ist damit 0,11 g / ($\text{m}^2 * \text{h}$) im Parkettboden und 0,07 g / ($\text{m}^2 * \text{h}$) bei Kalkstein. Eine niedrigere Temperatur im Boden würde den Massenstrom verkleinern.

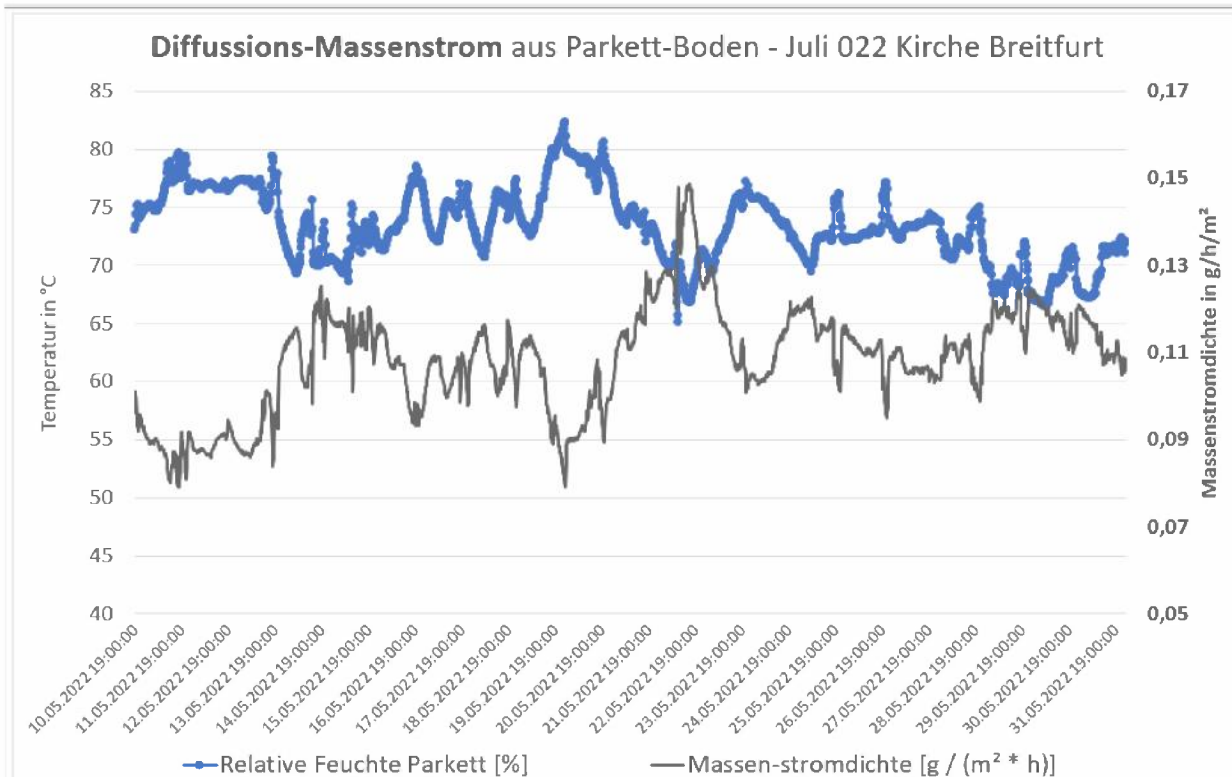
Der Diffusions-Massenstrom der Feuchte in den Saal beträgt insgesamt 11,4 g/h
(Fläche des Parkettbodens 61,9 m², des Kalkstein-Bodens 70,0 m²).

Aus den Momentanwerten errechnet sich der gleiche Mittelwert des Massenstroms.



Stofftransport.xlsx Dia Massenstrom Diffusion Boden

Der zeitliche Verlauf des Diffusions-Massenstrom folgt nicht eindeutig der Temperatur im Saal, sondern der relativen Feuchte des Parkettbodens.



Berechnung Stoffübergang Massenstrom

Der Stoffaustausch aus dem Fußboden in den Kirchensaal ist im vorherigen Kapitel als Diffusions-Massenstrom durch die Schichten des Bodens abgeschätzt. Vernachlässigt wurde dabei der Stoffübergang von der Oberfläche des Fußbodens in die Luft des Kirchensaals. Im folgenden wird **allein** der Stoffübergang abgeschätzt.

Der Fußboden in der Kirche wird als eine ausgedehnte waagerechte Platte angesehen, über die ein Luftstrom aufgrund von Unterschieden der Temperatur der Bodenplatte und des Kerns des Luftraums streicht. Dieses Modell kennt keine seitlichen geometrischen Begrenzungen. Insoweit kann mit diesem Modell nur die Obergrenze des Stoffübergangs ermittelt werden.

Allgemein wird der Stoffübergang nach [Brauer 1971] mit dem Massenstrom der Feuchte \dot{M}_{H_2O} beschrieben. Der Stoffübergangskoeffizient β bezieht sich auf den Übergang von der Grenzfläche in den Kern der Umgebung.

$$\dot{M}_{H_2O} = \beta / (R_{H_2O} * T) * A_{Boden} * (\rho_{H_2O,Boden} - \rho_{H_2O,Raumluft}) \quad (\text{Gl. 6.9})$$

\dot{M}_{H_2O} Massenstrom der Feuchte
 A_{Boden} durchströmte Fläche (Fußboden)
 $\rho_{H_2O,Boden}$ Partialdruck des Wasserdampfes
 $R_{H_2O} = 461,4 \text{ J/kg/K}$ Gaskonstante des Wasserdampfes
 Einheit $\{J/kg/K\} = \{Nm/kg/K\} = \{kg*m/s^2 * m/kg/K\} = \{Pa*m^2*m/kg/K\}$
 T die absolute Temperatur in Kelvin

Massenstrom der Feuchte aus dem Fußboden mit Partial-Dichten:

$$\dot{M}_{H_2O} = \beta * A_{Boden} * (\rho_{H_2O,Boden} - \rho_{H_2O,Raumluft}) \quad (\text{Gl. 6.9, A})$$

Der Stoffübergangskoeffizient β wird nach [Brauer 1971] mit empirischen Gesetzmäßigkeiten für freie Konvektion ermittelt. Vereinfachend wird der Grenzfall des Stoffübergangs aufgrund von Temperaturunterschieden betrachtet. Die Kopplung von Wärmeübergang und Stoffübergang wird vernachlässigt.

Stoffübergangskoeffizient β der Grenzschicht [Brauer]

Stoffübergang nach [Brauer 1971] mit dem Stoffübergangskoeffizient β (Übergang von der Grenzfläche in den Kern der Umgebung)

Die Stoffdaten von Wasserdampf zur Bestimmung der Rayleigh-Zahl $Ra = Gr * Sc$

X D Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft
 X ν kinematische Viskosität der feuchten Luft

Da die freie Konvektion hier auf **Temperaturunterschiede** zurückgeführt wird, ergibt sich für die Rayleigh-Zahl $Ra = \text{Grashof-Zahl } Gr * \text{Schmidt-Zahl } Sc$

$$Ra = Gr * Sc = g * L^3 / (\nu)^2 * (T_{H_2O,Boden} / T_{H_2O,Raumluft} - 1) * Sc$$

$$Sc = \nu / D$$

Die kennzeichnenden Abmessungen des Bodens sind:

X L Länge der Platte, charakteristische Abmessung
 X L auch als hydraulischer Durchmesser ($4 * \text{Fläche} / \text{Umfang}$)

Der Wärme- und Stoffübergang findet bei einer niedrigeren Temperatur der Grenzfläche statt $T_{\text{H}_2\text{O},\text{Boden}} < T_{\text{H}_2\text{O},\text{Raumluft}}$ - so gilt:

$$\text{Sh} = 0,27 * \text{Ra}^{1/4} \quad \text{für } 3 * 10^5 < \text{Ra} < 3 * 10^{10} \quad (\text{Gl. 6.59})$$

Im Kapitel „Berechnungsmethoden zum Wassertransport durch Diffusion“ sind Diffusionskoeffizienten angegeben:

Aus **[DIN 4108-3]** Anhang A zur Berechnung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g wird hier der Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten in Luft $D = 0,089 \text{ m}^2/\text{h}$ berechnet, entsprechend $2,47 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Bei der Diffusion von Wasser in Kalkstein hängt der scheinbare Diffusionskoeffizient nach [Klopfer 1974] vom Wassergehalt ab. Bei 7,5% Feuchte wird angegeben, mit Umrechnung $D = 0,072 \text{ m}^2/\text{h}$.

[Brauer] berichtet einen Diffusionskoeffizienten von Kohlendioxid in Luft von $1,66 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ Umgerechnet: $0,060 \text{ m}^2/\text{h}$.

Angesetzter Diffusionskoeffizient:	$2,0 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Kinematische Viskosität von Luft nach [Brauer]:	$1,58 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Schmidt-Zahl Sc (mit obigen Daten)	0,76
Erdbeschleunigung g	$9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

Charakteristische Länge L (Abstand zwischen Kirchenbänken) 0,2 m

Rayleigh-Zahl $Ra = \text{Grashof-Zahl } Gr * \text{Schmidt-Zahl } Sc$

$$Ra = g * L^3 / (\nu)^2 * (T_{\text{H}_2\text{O},\text{Boden}} / T_{\text{H}_2\text{O},\text{Raumluft}} - 1) * Sc$$

Ergebnis:

Der Stoffübergangskoeffizient β nach [Brauer 1971] lässt sich abschätzen für den Zeitraum 10. Mai 2022 bis 31.05.2022 als Mittel zu

$$\beta = 0,04 \text{ m/s } (+/- 0,026 \text{ m/s})$$

Daraus errechnet sich der mittlere Massenstrom, der allein aus dem Stoffübergang in der Grenzschicht in der Luft über der Oberfläche resultiert, bezogen auf Bodenfläche, von

$$g = 67 \text{ g } / \text{h } / \text{m}^2$$

Wenn allein der Stoffübergang in der Luft-Grenzschicht bei freier Konvektion bestimmend wäre, betrüge der Massenstrom der Feuchte in den Saal insgesamt 8.800 g/h

(Aus Fläche des Parkettbodens und des Kalkstein-Bodens $61,9 \text{ m}^2 + 70,0 \text{ m}^2$).

Zum Vergleich: Der Massenstrom aus Diffusion durch die Schichten der Baustoffe im Fußboden (Kapitel Berechnung Stoffdurchgang) ist erheblich geringer:

$$11,4 \text{ g/h}$$

Dieser Massenstrom aus Diffusion im Porenvolumen könnte durch gekoppelten Transport von Flüssigkeit an der inneren Oberfläche erhöht sein.

Bilanzierung – Feuchte-Austrag bei manueller Lüftung

Die Stoffströme von Wasserdampf, die in das Kirchengebäude gelangen und die aus dem Gebäude heraus gehen, sind mit der äußeren Hülle der Kirche abgegrenzt. Bilanziert wird der Wasserhaushalt der Kirche über mehrere Monate. Berücksichtigt wird auch die Speicherung der Feuchtigkeit in den Baustoffen des Gebäudes.

Folgende Massenstrome der Feuchtigkeit werden untersucht:

1. Eintrag von Feuchtigkeit in den Kirchenraum aus dem Fußboden und den Fundamentmauern – Diffusion in Kapitel „Fußboden als Quelle der Feuchtigkeit“
2. Eintrag von Regenwasser aus Schlagregen an undichten Fenstern – nicht berücksichtigt, Kapitel „Zusammenhang der Feuchte mit Regen“
3. Personen als Quelle der Feuchtigkeit – siehe einige Seiten zuvor
4. **Wasserdampf-Strom hinein - Wasserdampf-Strom heraus** aus natürlicher Lüftung über Fugen der blei-verglasten Fenster, der Eingangstür und Baufugen im Bereich vornehmlich der Dachdecke – Kapitel „Fugenlüftung“
5. **Wasserdampf-Strom hinein - Wasserdampf-Strom heraus** aus der frei von der Kirchendienerin durchgeführten Lüftung über die Klappfenster – Kapitel „Manuelle Lüftung“ und „Automatische Lüftung“
6. Änderung der Speicherung von Feuchte in den Einbauten aus Holz (Bänke, Fußboden) und in den oberflächen-nahen Schichten der Wände – Kapitel „Feuchtegehalt der Baustoffe“

Die Bilanz lautet

$$\text{Wasserdampf-Strom hinein - Wasserdampf-Strom heraus} = \text{Speicherung}$$

In folgender Tabelle sind die mittleren Massenströme der Feuchte bei **manueller Lüftung** für eine Periode der warmen Monate und der kalten Monate zusammen gestellt:

Stoff- Strom Nr.	Periode Manuelle Lüftung	01.06.22 – 30.09.2022 Sommer	01.11.22 – 28.02.2023 Winter
	Dichte-Differenz Innen-Außen [g/m ³]	1,92	0,04
	Relative Feuchte Innen [%]	62,7	80,9
	Geschwindigkeit im Fenster [m/s]	0,05	0,06
	Fenster-Volumenstrom [m ³ /h]	41,18	56,40
	Offenzeit der Fenster in Prozent des Tages	0,28	0,01
5	Massestrom Feuchte manuelle Fenster-Lüftung (wenige h/d) [g/h]	20,42	0,13
	Masse Feuchte Fenster-Lüftung pro Tag [g/d]	490,0	3,1
	Differenzdruck Pa	0,0016	0,0033
	Fugen-Volumenstrom m ³ /h	2,33	3,62
4	Massenstrom Feuchte durch Fugen [g/h]	4,54	-0,61
1	Diffusions-Massenstrom der Feuchte aus Fußboden in den Saal [g/h]	11,4	11,4
3	Feuchte von Personen 2-mal 1 kg pro Monat [g/h]	2,7	0
	Bilanz Massenstrom Heraus - Hinein [g/h]	10,86	-11,87

Tagesdaten.xlsx - Perioden Bilanz-Mengen - Teil 1

Auffällig ist der negative Saldo der Massenströme in den kalten Monaten – im Gebäude

19.04.2023 – ergänzt 23.08.2023

wird Feuchtigkeit eingetragen und gespeichert. Wenn im Dezember 2022 Gottesdienste in der Kirche gefeiert wären (was wegen der Corona-Pandemie unterblieben ist), so wäre die Bilanz für die kalten Monate noch schlechter ausgefallen (siehe Tabelle unten).

Bilanzierung – Feuchte-Austrag bei automatischer Fenster-Lüftung

Wie zuvor beschrieben, wird statt einer manuellen Lüftung durch die Kirchendienerin eine automatische Lüftung untersucht. Die automatische Lüftung ist jedoch keine gesteuerte Abluftanlage, sondern lediglich die Fenster werden automatisch geöffnet und geschlossen. Folgende Bedingungen soll die automatische Feuchte-Steuerung erfüllen:

- Betrieb bis zu einer Außentemperatur von **-5 °C**
(Im Kirchensaal sind keine frost-gefährdeten Installationen, wie Warmwasser-Heizung, Waschbecken, eingebaut. Ein WC-Raum ist über eine elektrische Frostwächter-Heizung abgesichert.)
- Betrieb ab einer minimalen Differenz der Dampfdichte innen und außen von 10% der Werte außen (kumulierte Messfehler Feuchte 4%, Temperatur 1 Kelvin)

Automatische Fenster-Lüftung mit Kontroll-Bedingungen:

Der Saldo für die kalten Monate ist verbessert, aber nicht ausreichend. Die in den Sommermonaten erreichte niedrige relative Feuchte kann nicht gehalten werden. Es dürfte sich wieder das berichtete feuchte Klima in der Kirche einstellen.

Stoff- Strom Nr.	Periode Automatische Lüftung	01.06.22 – 30.09.2022 Sommer	01.11.22 – 28.02.2023 Winter
	Dichte-Differenz Innen-Außen [g/m ³]	1,92	0,04
	Relative Feuchte Innen [%]	62,7	80,9
	Geschwindigkeit im Fenster [m/s]	0,05	0,06
	Fenster-Volumenstrom [m ³ /h]	41,2	56,4
5	Feuchte-Strom automatische Fenster-Lüftung mit Bedingungen [g/h]	92,4	11,7
	Dichte Außen [g/m ³]	10,24	6,31
	Dampf-Dichte Saal-Wand [g/m ³]	12,03	6,26
	Differenzdruck Pa	0,0016	0,0033
	Fugen-Volumenstrom m ³ /h	2,33	3,62
4	Massenstrom Feuchte durch Fugen [g/h]	4,54	-0,61
1	Diffusions-Massenstrom der Feuchte aus Fußboden in den Saal [g/h]	11,4	11,4
3	Feuchte von Personen: 2-mal 1 kg pro Monat, 24.12. 100 Personen, 26.12. 50 P., Winterkirche [g/h]	2,7	4,7
	Bilanz Massenstrom Heraus - Hinein [g/h]	82,88	-5,05

Tagesdaten.xlsx - Perioden Bilanz-Mengen - Teil 2

Angesichts aller Unsicherheiten in der Bilanzierung der Feuchte in der Kirche – empirische Beziehung von Windgeschwindigkeit des DWD mit der Luftgeschwindigkeit in den Fenstern, Feuchte-Austrag aus dem Fußboden und Fundamentmauern – sollte durch eine technische Maßnahme erreicht werden, dass die Feuchte-Bilanz im Winter zumindest ausgeglichen ist, um die relative Feuchte in der Kirche unter 70% zu halten.

Wenn die manuelle Lüftung im Sommer als Zielgröße angesehen wird, so könnte entsprechend den monatlichen Maxima des Feuchte-Austrags von 29 g/h im Juni und

August ein Lüftungs-Massenstrom von etwa 25 g/h in den Winter-Monaten angestrebt werden.

Dies hätte nach obiger Tabelle statt des negativen Saldos des Feuchte-Austrags von -5,05 g/h einen positiven Saldo von 8,3 g/h zur Folge.

Dies deckt sich mit dem Saldo von 10,86 g/h aus der manuellen Lüftung im Sommer 2022.

Fazit:

Ziel der Untersuchung ist, Möglichkeiten aufzuzeigen, die die relative Feuchte in der Kirche dauerhaft – insbesondere in den kalten Monaten – in einen Bereich außerhalb der Bildung und des Wachstums von Schimmel versetzt. Die Messungen in der Kirche Breitfurt und die bilanzierenden Berechnungen zeigen, dass eine automatische Fenster-Lüftung dies nicht leisten kann. Manuell ist dies erst recht nicht möglich, weil sich die Wetterverhältnisse innerhalb von Stunden ändern.

In Betracht zu ziehen, sind daher andere Lösungen, wie eine geringe Beheizung der Kirche und eine Abluftanlage, Einhalten einer Grundtemperatur bei weiterhin manueller Lüftung durch die Fenster oder eine feuchte-gesteuerte Abluftanlage mit Ventilator.

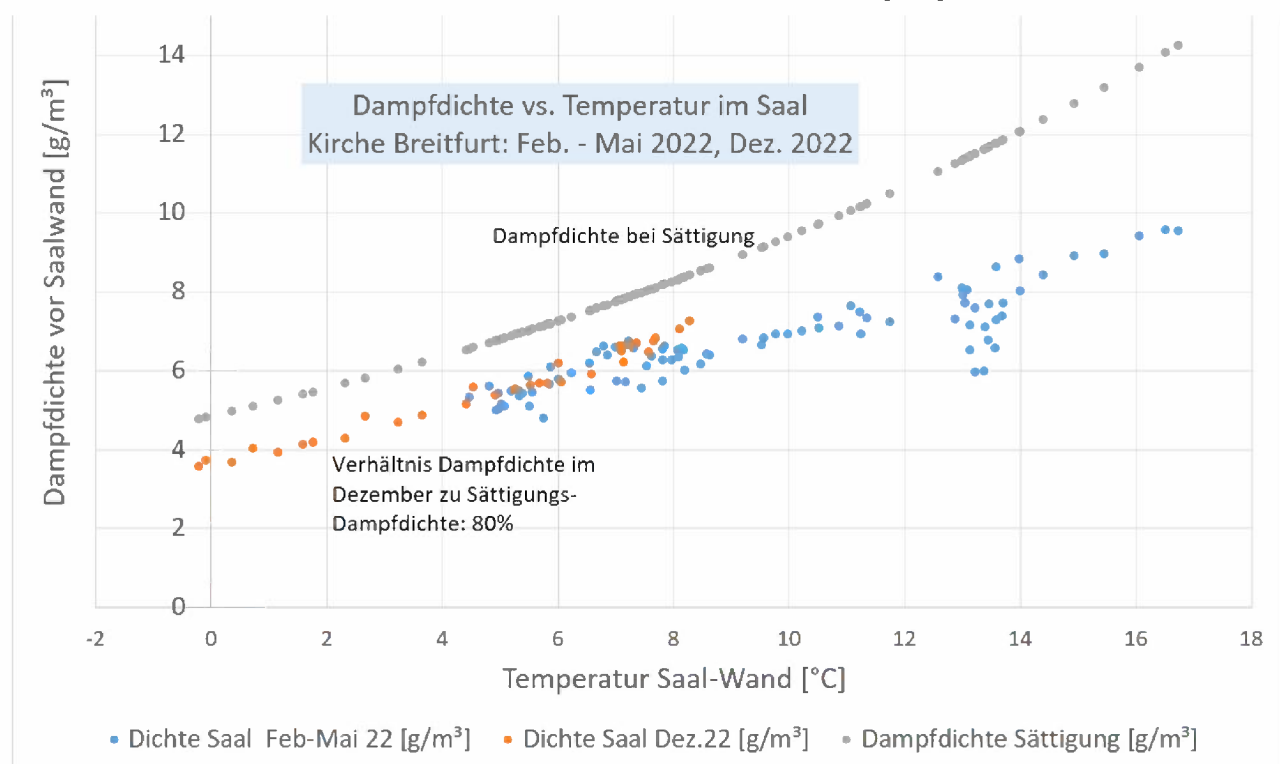
Technische Lösung: Beheizung der Kirche

Die technische Lösung zur Behebung der Schimmelbildung in der Kirche sollte aus zwei Komponenten bestehen:

1. feuchte-gesteuerte Lüftung über die Klappfenster, Auslass in der Decke über der Empore, Rohrventilator, Luftklappe und Ableitung in den Turm
2. Heizung des Kirchensaals auf eine geringe Übertemperatur, die über der wechselnden Außentemperatur gehalten wird, oder eine Grundtemperatur

Ziel ist, einen Massenstrom an Wasserdampf von 25 g/h im Saldo auszutragen. Zugleich sollte die Lüftung zumindest im Umfeld von Veranstaltungen verbessert werden. Das Raumvolumen von 726 m³ bedingt schon bei kleinen anzustrebenden Luftwechsel einen hohen Volumenstrom für die Lüftung.

Wenn die Raumtemperatur des Kirchensaals durch Wärmezufuhr erhöht wird, stellt sich auch eine höhere Dampfdichte ein. Diese höhere absolute Feuchte steht in enger Beziehung zur Sättigung und zu den Vorgängen des Stoffaustausches in der Kirche. In den Monaten, in denen kaum manuell gelüftet wurde und daher der Stoffaustausch etwas verringert ist, besteht eine klare Abhängigkeit der Dampfdichte im Saal von der Raumtemperatur. Im Dezember 2022 ist der Abstand zur Sättigungs-Linie konstant 80%.



Die Dampfdichte - T-innen 2022 (Tagesmittelwerte)

Der Feuchte-Austrag bestimmt sich aus der gewünschten Raumtemperatur und der von ihr abhängigen Dampfdichte, den entsprechenden Daten der Außenluft und dem gewünschten Lüftungs-Volumenstrom.

Der erforderliche Wärmestrom errechnet sich aus dem Lüftungs-Volumenstrom und den Transmissions-Wärmeverlusten.

Bei **konstantem Wärmestrom** folgt die Raumtemperatur der Außentemperatur mit einer gewissen Temperatur-Differenz.

Es könnte auch eine **Grundtemperatur** eingestellt werden, die den Wärmebedarf ohne zusätzlichen Nutzen erhöht. Vorteilhafter dürfte eine Kombination beider Vorgaben sein. Die Raumtemperatur könnte der Außentemperatur weitgehend folgen und nur zu Veranstaltungen wird eine Grundtemperatur eingestellt.

Berechnungs-Schritte für Volumenstrom der Luft, Massenstrom der ausgetragenen Feuchte und Heizlast aus Tagesmittelwerten für die kalten Monate:

1. Voraussetzungen: gewünschter Lüftungs-Volumenstrom und Spanne der Übertemperatur bzw. Grundtemperatur
2. Daten der Außenluft und des Raums: Temperatur, Dampfdichte (Differenz der absoluten Feuchte zwischen Innen und Außenbereich [g/m³])
3. tägliche Betriebszeit der Lüftung
4. → mittlerer Feuchte-Austrag [g/h]
5. → erforderlicher Wärmestrom aus Lüftungs-Volumenstrom und Fugenlüftung
6. → erforderlicher Wärmestrom aus Transmissions-Wärmeverlusten
7. → zusätzlich erforderlicher Wärmestrom, um eine Grundtemperatur zu halten

Die Transmissions-Wärmeverluste sind nach Norm DIN V 4108-06:2003-06 für die Kirche berechnet. Sie betragen mit Wärmebrücken 1.202 W/K.

Zusammenfassung Bauteile	Fläche außen, netto	Flächen-Anteil < 10% (Sanierung frei, §9 (3) EnEV)	u-Wert Berechnet W/(m ² K)	Temperatur-Korrekturfaktor Fxi [-]	U · A · Fxi Wärmestrom im Bestand W/K
Außenwand Sandstein mit Dicke von 0,84 m	96,90 m ²	14,1%	1,669	1,0	161,71
Außenwand Sandstein, Dicke 0,75 m	210,64 m ²	30,7%	1,842	1,0	388,01
Fenster Kunstverglasung	25,34 m ²	3,7%	5,6	1,0	141,93
Steildach	,00 m ²	0,0%	1,289	1,0	0,00
Oberste Geschossdecke	175,95 m ²	25,6%	0,194	0,5	17,07
Fundamentmauern - Grundfläche	45,33 m ²	6,6%	4,609	0,5	104,47
Fußboden Kalkstein	70,05 m ²	10,2%	6,855	0,5	240,10
Fußboden auf Erdreich, Parkett	61,92 m ²	9,0%	2,606	0,5	80,70
Summen, beheizte Aussenflächen	686,13 m²				1133,99
Wärmebrücken-Korrekturwert Standard	686,13 m²		0,100		68,61
Transmissionswärmeverlust mit Wärmebrücken					1202,6

Heizlast Kirche Breiffurt 2021.xlsx

Eingangsdaten der Berechnung:

- Erhöhung der Temperatur des Saals gegenüber Tageswerten um 1 - 3 K
- Betriebszeit der Lüftung: acht Stunden pro Tag
- Lüftungs-Volumenstrom 300 m³/h bzw. 450 m³/h
- Fehlerspanne für die Dampfdichte 5 % (siehe Kapitel automatische Lüftung)
- Grenztemperatur von -5 °C außen, unterhalb derer nicht mehr gelüftet wird

Die angestrebte Belüftung der Kirche soll mit einer geringen Wärmeleistung bei ständigem Heizen realisiert werden. Die Raumtemperatur wird gegenüber den Messwerten geringfügig erhöht. Die Raumtemperatur schwankt damit wie bisher und folgt der Außentemperatur.

Die Belüftung erfolgt stundenweise mit einem Ventilator. Der Ventilator sollte immer dann laufen, wenn die Bedingungen für den Feuchte-Austrag gegeben sind. Die Analyse zeigt, dass im Dezember 2022 dies auch nur in wenigen Stunden nachts erfüllt war.

Mit den aufgelisteten Eingangsdaten wird der Massenstrom der Feuchte durch die Lüftung ermittelt. Die Analyse mit den Messdaten auf der Basis von Tagesmittelwerten ergibt im Dezember einen kritischen kleinen Feuchte-Austrag. Die Kontrolle mit Stundenmittelwerten zeigt, dass keine kritische Lage eintritt und der Feuchte-Austrag ausreichend groß sein wird.

Ergebnisse für verschiedene Übertemperatur und Luft-Volumenströme:

Monat (ab 10-2022)	Feuchte-Austrag bei automatischer Fenster-Lüftung und mit Heizung (Fehlerrspanne 5%, Außen-T > -5°C) Mittelwert ganzer Tag [g/h]						
	0,5 K	0,5 K	1,0 K	1,0 K	2,0 K	2,0 K	3,0 K
Temperatur-Überhöhung gegen Tageswerte							
Lüftungsvolumenstrom (8h pro Tag)	450 m³/h		300 m³/h		450 m³/h		450 m³/h
	Basis der Messdaten	Tag	Stunde	Tag	Stunde	Tag	Tag
10	50,5	94,1	58,5	72,9	102,4	153,5	258,5
11	78,1	96,3	68,4	80,1	124,2	186,3	261,6
12	19,2	72,2	16,1	58,1	23,0	34,6	53,9
13	42,1	61,8	36,3	53,9	61,7	92,6	139,2
14	79,5		59,8		86,2	129,4	162,2
15	96,8		75,6		101,1	151,6	214,6
Wärmebedarf Transmission kW	0,60	0,60	1,20	1,20	2,40	2,40	3,61
Wärmebedarf Lüftung kW	0,03	0,03	0,04	0,04	0,07	0,11	0,16
Wärmebedarf monatlich kWh/M.	452	452	891	891	1.783	1.809	2.713

Tagesdaten.xlsx Übersicht mit Heizung

Die Analyse zeigt ausreichendes Potential, um den Feuchte-Austrag während aller kalten Monate sicher zu stellen, so dass sich eine relative Feuchte deutlich unter dem Bereich der Schimmelbildung einstellt.

Der monatliche Wärmebedarf von 452 kWh wird über die gesamte kalte Zeit benötigt. Dies gilt auch für die benutzungsfreie Zeit von Januar bis März (Winterkirche). Damit ist der Jahres-Wärmebedarf etwa 2.700 kWh/a.

Sollte eine Grundtemperatur von etwa 10°C über Weihnachten gewünscht sein, wird je nach Außentemperatur (+4°C) eine Wärmeleistung von 7 – 9 kW benötigt. Der Jahres-Wärmebedarf würde auf etwa 3.700 kWh/a steigen. Regenerative Wärme wird vom Nachbarn über einen überdimensionierten Heizkessel für Scheitholz angeboten.

Die Aufheizung der Kirche auf die Raumtemperatur der Nutzung würde weiterhin mit der elektrischen Unterbank-Heizung bei einer Geschwindigkeit von etwa 1,1 K/h erfolgen.

Grundtemperatur und konventionelle gelegentliche Fenster-Lüftung

Die Kirche Breitfurt wird im Winterhalbjahr nur bis Silvester bei Gottesdiensten und bei Veranstaltungen beheizt. In der Zeit dazwischen stellt sich die Raumtemperatur entsprechend der Außentemperatur ein. Zwischen Silvester und Ostern wird statt der Kirche das Gemeindehaus genutzt.

Die Kirche wird elektrisch mit Unterbank-Heizung gezielt zu den Veranstaltungen beheizt. Dabei steuert ein Zeitprogramm die Heizung, die in zwei Leistungs-Stufen geschaltet wird. Zunächst wird mit geringer Leistung aufgeheizt, so dass die Solltemperatur von etwa 16°C (Thermostat) fast erreicht wird. Kurz vor Beginn des Gottesdienstes werden mit der vollen Heizleistung alle Kirchenbänke angewärmt.

Der Verbrauch von elektrischem Strom für die Heizung liegt bei 2.000 bis 3.500 kWh pro Jahr. Würde auf eine Grundtemperatur geheizt und nur bei Veranstaltungen die gewohnte Raumtemperatur eingestellt, so würde sich der Heizenergie-Bedarf erheblich erhöhen. Der Transmissionswärmeverlust der Kirche mit dickem Sandstein-Mauerwerk ist nach DIN 4108-6 etwa 1,2 kW/K. Eine Grundtemperatur von beispielsweise 8°C (Heizungsrichtlinie vom Februar 2022) bedingt bei einer mittleren Außentemperatur im Januar oder Februar von 1°C einen mittleren Heizenergie-Verbrauch von 8,4 kW.

Dies summiert sich über das Winterhalbjahr auf einen Jahresverbrauch in der Größenordnung von 18.000 kWh.

Bei einem Brennstoffpreis um 10 Cent pro kWh (Holzpellets, Heizöl) ergäbe sich aus dem jährlichen Mehrbedarf die Mehrkosten von 1.500 €. Wenn die technische Lebensdauer einer Abluftanlage einer Heizungsanlage von 20 Jahren entspricht, würde eine Investition in eine Abluftanlage ökonomisch und aus Sicht des Klimaschutzes die bessere Lösung sein.

Fazit

Würde eine Grundtemperatur in den kalten Monaten eingehalten, so könnte konventionell weiterhin manuell durch die Kirchendienerin gelüftet werden. Nach Bedarf könnte gezielt gelüftet werden, da die Dampfdichte in der Kirche bei fast allen Wetterbedingungen deutlich höher ist als außen.

Jedoch wird dies durch hohen Wärmebedarf und damit verbundene Kohlendioxid-Emissionen erkauft, wenn die Heizung mit fossilen Brennstoffen betrieben wird.

Technische Lösung: Abluftanlage in unbeheizter Kirche

Unbeheizte Kirche bedeutet, dass der Kirchensaal nur zu Gottesdiensten geheizt wird. Anschließend bleibt die Heizung bis zum nächsten Gottesdienst ausgeschaltet. Die Temperatur in der Kirche folgt dann der Außentemperatur.

Die technische Lösung zur Behebung der Schimmelbildung in der unbeheizten Kirche sollte aus einer automatischen Feuchte-Steuerung, gesteuerten Klappfenstern, einem Auslass in der Decke über der Empore, Abluftventilator, Luftklappe und Ableitung in den Turm bestehen. Die gesteuerte Abluftanlage soll die Fenster automatisch öffnen und schließen und den Abluft-Ventilator schalten.

Folgende Bedingungen soll die automatische Feuchte-Steuerung erfüllen:

- Betrieb bis zu einer minimalen Raumtemperatur von 0 °C
(Im Kirchensaal sind keine frost-gefährdeten Installationen, wie Warmwasser-Heizung, Waschbecken, eingebaut. Ein WC-Raum ist über eine elektrische Frostwächter-Heizung abgesichert.)
- Betrieb ab einer minimalen Differenz der Dampfdichte innen und außen von 10%, bezogen auf die Werte außen
(kumulierte Messfehler der Feuchte von 4% und der Temperatur von 1 Kelvin), oder einer minimalen Taupunkt-Differenz von 1 Kelvin bei Ein-Aus-Phasen von je 10 Minuten
- möglichst nachts ab 22 Uhr bis 6 Uhr keine Lüftung durch den Ventilator

Eine ideale Feuchte-Steuerung würde geringe Unterschiede der Dampfdichte / Wasserdampf-Partialdruck zwischen Innen und Außen bereits nutzen. Allein die Meßfehler der Sensoren für Feuchte und Temperatur würden den minimalen Dichteunterschied bestimmen. Die Schwelle für die Steuerung könnte damit 10% der Dampfdichte außen sein.

Eine konkret angebotene, günstige Feuchte-Steuerung lässt nur eine Innentemperatur von minimal 5°C zu, bei tieferen Temperaturen, die wochenlang herrschen können, ist keine Lüftung möglich (Pfako, Standard-Gerät; Umrüstung angefragt).

Der Lüftungsregler P20 von Infera bietet eine einstellbare Frostschutz-Temperatur, die zwischen 0,0°C und 9,5°C ist.

In der Bedienungsanleitung ist keine minimale Schaltdifferenz aus dem Vergleich der Istgrößen (wie Differenz der Dampfdichte bzw. Taupunkttemperatur) angegeben, sondern eine Anzeige der Dampfdichten von Außen und Innen oder der beiden Taupunkt-Temperaturen in einem Display. (Zitat der Bedienungsanleitung : „Der Lüftungsregler errechnet aus der Innentemperatur/Innenfeuchte und der Außentemperatur /Außenfeuchte die absolute Feuchte. Aus dem Vergleich und dem Sollwert ergibt sich die Entscheidung zu Lüften oder nicht, bzw. Fenster „AUF“ oder „ZU“.).

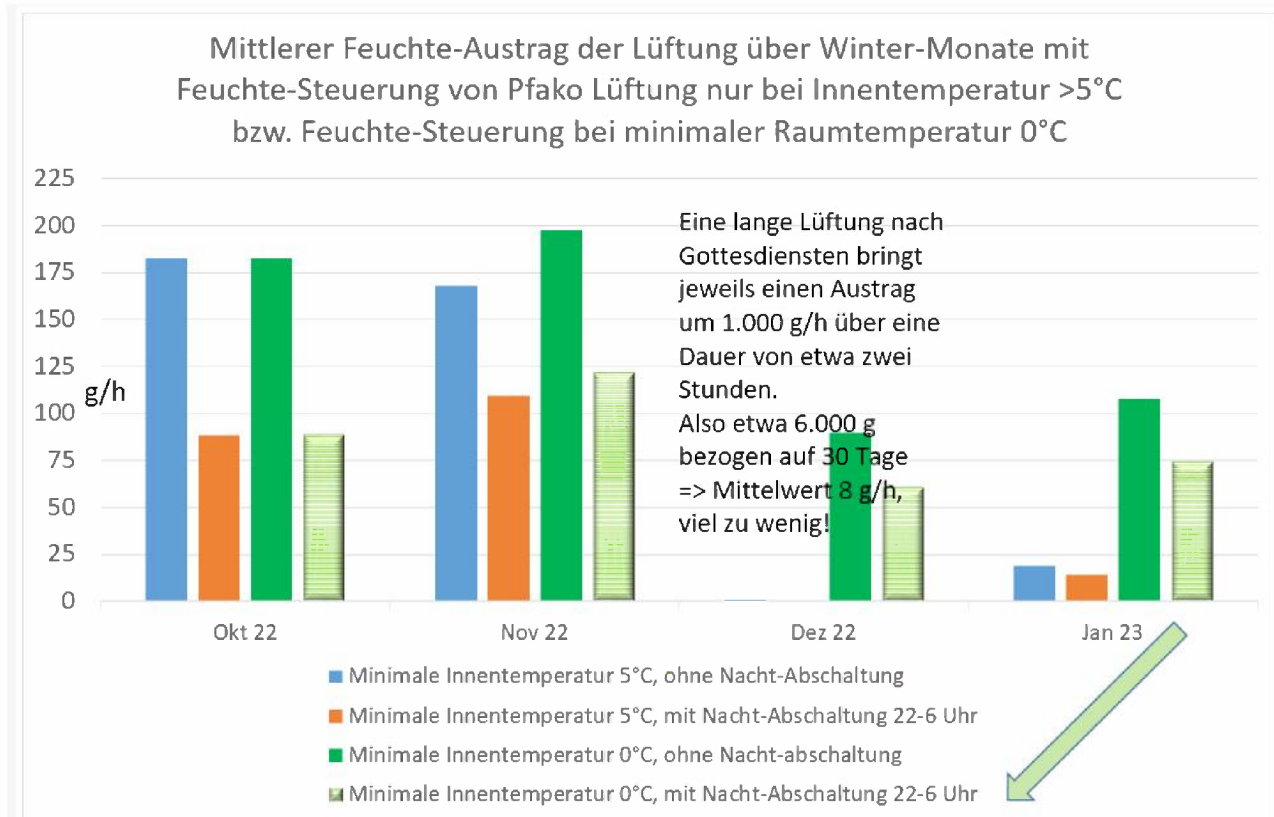
Um eine minimale Innentemperatur von beispielsweise 0°C als untere Grenze des Arbeitsbereichs realisieren zu können, wäre auch eine angepasste Smart Home Lösung geeignet (Loxone, usw.).

Eine weitere Anforderung stellt der Schallschutz, da die Vorschrift TA Lärm eine Schallimmission von 60 dB(A) am nächst gelegenen Wohnhaus tagsüber fordert und

nachts eine Grenze von 45 dB(A) unterschritten sein muss. Die Auswahl des Ablufventilators und die Gestaltung der Einbau-Situation müssen daher sorgfältig erfolgen. Sollte die nächtliche Grenze nicht eingehalten werden können, müsste die Abluftanlage beispielsweise mit einer Leichtbauwand ummantelt werden.

Ziel ist, einen monatlich gemittelten Massenstrom an Wasserdampf von 25 g/h im Saldo auszutragen (Kapitel Automatische Fensterlüftung, Seite 39). Die Analyse verwendet Stundenmittelwerte, keine Tagesmittel.

Eine Simulation des Feuchte-Austrags durch eine Abluftanlage ist für die kalten Monate ausgeführt. Stundengenau sind die gemessenen Parameter in die Simulation eingesetzt. Die Bedingungen sind eine minimal zulässige Raumtemperatur von +5°C bzw. 0°C (Umrüstung bei Pfako angefragt), ein effektiver Volumenstrom des Abluft-Ventilators von 450 m³/h, eine mögliche Nachtabschaltung von 22 Uhr bis 6 Uhr und die geringst mögliche Ansprech-Schwelle für den Feuchte-Unterschied von Innen und Außen (Taupunkt-Δ 1K). Die Ergebnisse zeigt folgendes Diagramm für die Monate Oktober 2022 bis Januar 2023.



Lüftung 1h-Mittel großer Ventilator.xlsx - Dia Lüftung Winter-Monate

Ziel ist, einen monatlich gemittelten Massenstrom an Wasserdampf von 25 g/h im Saldo auszutragen. Dies ist mit min. 60 g/h für die kalten Monate erreicht. Ein kleinerer Volumenstrom von 400 m³/h des Ventilators würde für die verwendeten Messwerte des Winters 22/23 ausreichen, böte jedoch keine Sicherheits-Reserve.

Der Ventilator mit dem Volumenstrom 900 m³/h und der Phasenschaltung der Lüftungs-Steuerung von Pfako würde eine Luftwechselrate von 0,62 h⁻¹ ergeben.

Die Bilanz über die Kirche mit allen Mengenströmen zeigt folgende Tabelle mit dem Vergleich mittlerer Werte für Sommermonate und Wintermonate.

Teil 4			
Stoff- Strom Nr.	Periode Automatische Lüftung Pfako, jedoch Raumtemperatur-Schwelle 0°C, bzw. Lüftungssteuerung Infera Ventilator ebm-Papst 900 m³/h	01.06.22 – 30.09.2022 Sommer	01.11.22 – 31.01.2023 Winter
	Dichte-Differenz Innen-Außen [g/m³]	1,92	0,04
	Relative Feuchte Innen [%]	62,7	80,9
	Geschwindigkeit im Fenster [m/s]	Abluft-Ventilator	
	Volumenstrom, gemittelt über Ein-Aus-Phasen [m³/h]	450	450
5	Feuchte-Strom automatische Fenster-Lüftung mit Bedingungen mit Nacht-Abschaltung 22-6 Uhr zum Lärmschutz (aus Stundenmittelwerten Datei Lüftung 1h-Mittel großer Ventilator.xls - Register Monate Pfako-Steuerung, jedoch nur für drei Wintermonate) [g/h]	Annahme: wie auto. Fenster- Lüftung 92,4	85,6
	Dichte Außen [g/m³]	10,24	6,31
	Dampf-Dichte Saal-Wand [g/m³]	12,03	6,26
	Differenzdruck Pa	0,0016	0,0033
	Fugen-Volumenstrom m³/h	2,33	3,62
4	Massenstrom Feuchte durch Fugen [g/h]	4,54	-0,61
1	Diffusions-Massenstrom der Feuchte aus Fußboden in den Saal [g/h]	11,4	11,4
3	Feuchte von Personen: 2-mal 1 kg pro Monat, 24.12. 100 Personen, 26.12. 50 P., Winterkirche [g/h]	2,7	4,7
	Bilanz Massenstrom Heraus - Hinein [g/h]	82,88	68,87

Tagesdaten Kirche ohne Heizung.xlsx - Perioden Bilanz-Mengen - Teil 4

Die Bilanz weist nach: Die in den Sommermonaten erreichte niedrige relative Feuchte kann auch in der kalten Jahreszeit eingehalten werden.

Fazit

Die Analyse weist nach, dass eine gesteuerte Abluftanlage einen ausreichenden Feuchte-Austrag während aller kalten Monate sicher stellt, so dass die relative Feuchte – wie im Sommer – deutlich unter dem Bereich der Schimmelbildung bleiben wird.

Die Bedingungen für die Feuchte-Steuerung sind eine minimal einstellbare Raumtemperatur von 0°C und eine geringst mögliche Ansprech-Schwelle für den Feuchte-Unterschied von Innen und Außen (Taupunkt-Δ 1K).

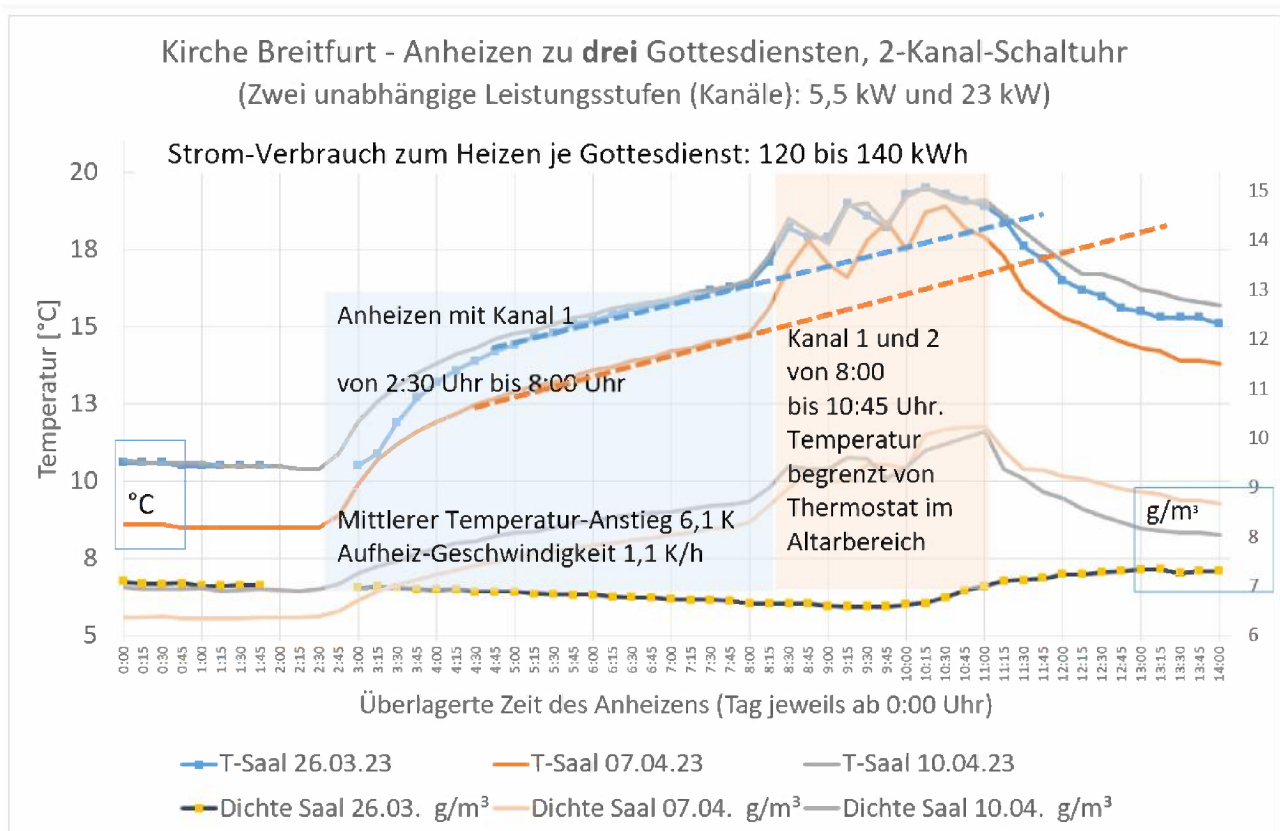
Wesentlich bestimmt die Lüftungssteuerung den Feuchte-Austrag in den kalten Monaten über die von Steuerung zugelassene minimale Raumtemperatur. Wenn als minimale Raumtemperatur 0°C eingestellt werden kann, wird ausreichend Feuchte ausgetragen. Im anderen Fall wird nur unwesentlich Feuchte in der unbeheizten Kirche im Dezember und Januar – den typischen Monaten mit häufigem Frost – ausgetragen. Der aufgrund der Gesamtschall-Emission und der geringen elektrischen Leistung favorisierte Ventilator ist ein ebm-papst GreenTech EC-Axiallüfter · max. 1.060 m3/h, max. 96 Pa, Ø 200 mm, 58 W.

Beispiel Heizbetrieb der Kirche und Feuchte

Beim Anheizen der Kirche durch die elektrische Unterbank-Heizung zeigt sich ein starker Anstieg der relativen Feuchte der Raumluft.

Das folgende Diagramm zeigt den Temperatur-Verlauf in der Kirche beim Aufheizen an drei verschiedenen Tagen. Das Anheizen verläuft mit nahezu konstanter Aufheiz-Geschwindigkeit, solange nur die geringe Heizleistung (Kanal 1) geschaltet ist. Das spätere Zuschalten der vollen Heizleistung bewirkt keine weitere lineare Erhöhung der Raumtemperatur. Ein Raumthermostat begrenzt die Temperatur im Kirchensaal.

Die Dampfdichte zeigt kein einheitliches Verhalten. An einem Tag blieb sie relativ konstant. An anderen Tagen erhöht sich die Dampfdichte mit dem Aufheizen. Soweit nicht gelüftet wird, sollte die Dampfdichte wegen des fehlenden Austausches mit der Atmosphäre unverändert bleiben. Wenn die Dampfdichte in den wenigen Stunden des Aufheizens ebenfalls ansteigt, wird Feuchte aus dem Mauerwerk und dem Mobiliar in die Raumluft abgegeben und beim Abkühlen wieder von den Materialien aufgenommen.



Tagesdaten Kirche ohne Heizung.xlsx - Dia Temp-Verlauf 3-mal Anheizen

Literaturverzeichnis

Brauer, Heinz (1971): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main.

Brauer, Heinz; Mewes, Dieter (1971): Stoffaustausch – einschließlich chemischer Reaktionen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main.

DIN 4108-3:2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN V 4108-06:2003-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahreheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfs.

DIN EN ISO 13788:2013-05: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnern – Berechnungsmethoden.

DIN EN ISO 13789:2008-04: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren.

Duzia, Th.; Bogusch, N. (2020): Basiswissen Bauphysik – Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

EN 13829:2000: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hg.): MASEA – Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung.

Online im März 2022 verfügbar unter www.masea-ensan.de

Kilian, R. (2013): Klimastabilität historischer Räume – Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. In: Sedlbauer, K.; Hauser, G. (Hg.): Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, Band 15. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.

Klopper, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen – insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen. Bauverlag Wiesbaden und Berlin.

Umweltbundesamt (2005) – Innenraumlufthygiene-Kommission (Hg.): Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen - Schimmelpilzsanierungs-Leitfaden

Haar, K.; Gallagher, J. S.; Keil, G. S. (1988): NBS/NRC Wasserdampf Tafeln. In Grigull, U., Springer-Verlag, Berlin

WUFI® Light. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.

<https://wufi.de/de/software/produktuebersicht/#bauteilsimulation>

Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018): Bauphysik – Bau und Energie. VdF Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 5. Auflage.

Anhang

Die Grundlagen der Transportmodelle für Feuchte werden im folgenden referiert.

Table of Contents - Anhang

Anhang.....	60
Modelle des Stofftransports.....	60
Umrechnung Feuchte von Wasserdampf in Dampfdichte.....	61
Stoffübergang von Wasserdampf bei freier Konvektion	62
Berechnungsmethode zum Wassertransport durch Konvektion	64
Lüftung durch Fugen.....	65
Differenzdruck des Windes über das Kirchengebäude.....	68
Wetter-Daten des DWD.....	69
Umrechnung von Stationsdaten auf örtliche Windgeschwindigkeit	70
Fensterlüftung.....	74
Lüftungsanlagen.....	76
Physikalische Modelle zum Wassertransport in Bauteilen.....	77
Ausgleichsfeuchte und Sorptionsisotherme.....	79
Dynamisches Feuchtespeichervermögen (Nordtest-Verfahren).....	81
Berechnungsmethoden zum Wassertransport durch Diffusion	82
Diffusionskoeffizient und Feuchtegehalt.....	85
Beschreibungen zur Bausubstanz.....	86
Sanierung des Putzes in 1999.....	86
Dach und Fußboden.....	86
Schimmelpilz	88
Blockade der Orgel in Breitfurt.....	91
Umbau der elektrischen Heizung.....	91

Modelle des Stofftransports

Modelle des Stofftransports beschreiben den Übergang von Wasserdampf aus dem Boden in die Luft als freie Konvektion und sie beschreiben die Lüftung des Kirchenraumes.

Die Berechnungsmethoden werden auf Wände, die Decke unter dem Satteldach und den erdberührten Fußboden angewendet. Diese Bauteile und die Fenster bilden die Grenzen des betrachteten Bilanz-Systems.

Umrechnung Feuchte von Wasserdampf in Dampfdichte

Die Stoffdaten von Wasserdampf – Partialdruck und Dampfdichte – sind in Tabellen dokumentiert und mit Näherungsformel in Normen beschrieben:

- Haar, K.; Gallagher, J. S.; Keil, G. S.: NBS/NRC Wasserdampf Tafeln. Hrsg. Grigull, U., Berlin: Springer 1988
- DIN EN ISO 13788:2013-05 Tabelle Anhang E

[DIN 4108-3:2001-07] zum Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3 enthält die Näherungsformel (A6) mit Tabelle A.3, aber sie führt zu falschen Werten! Der Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s (Einheit Pa) als Funktion der Temperatur ϑ (°C) sollte mit folgender Formel (A6) und Konstanten berechnet werden:

$$p_s = a * (b - \vartheta / 100)^n$$

mit $a = 288,68$ Pa, $b = 1,098$, $n = 8,02$
für Temperaturbereich 0°C bis 30°C.

Die Formel ist falsch!

Nach [EN 13829:2000] zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden wird mit der Formel (B.3) der Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s in Luft in Abweichung von 0,1% berechnet:

$$p_s = \exp \{59,484085 - 6790,4985 / (\vartheta + 273,15) - 5,02802 * \ln (\vartheta + 273,15)\}$$

Die Dichte des Wasserdampfes im Sättigungszustand wird mit dem idealen Gasgesetz aus dem Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s berechnet.

Dichte Wasserdampf $\rho_{H_2O} = p_s / (R_{H_2O} * T)$ – mit obigen Einheiten in kg/m³

$$R_{H_2O} = 461,4 \text{ J/kg/K} \text{ Gaskonstante des Wasserdampfes}$$

$$\text{Einheit } \{J/kg/K\} = \{Nm/kg/K\} = \{kg*m/s^2 * m/kg/K\} = \{Pa*m^2*m/kg/K\}$$

T die absolute Temperatur in Kelvin

[DIN EN ISO 13788:2013-05] listet in Tabelle Anhang E für einen weiten Bereich der Temperatur den Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s auf. Diese Daten weichen um etwa 0,1% von den Daten aus [Haar, K. 1988] ab.

Der Dampfdruck wird nach Formel E.1 aus [DIN EN ISO 13788:2013-05] berechnet. Die Abweichung des Dampfdrucks nach dieser Formel E.1 zu den Tabellenwerten beträgt weniger als 0,05%. Dampfdruck des Wassers

$$p_s = 610,5 * \text{EXP}(17,269 * \vartheta / (237,3 + \vartheta))$$

Formel E.1 aus [DIN EN ISO 13788:2013-05], in Pa

Dichte des gesättigten Wasserdampfes

$$\rho_{H_2O} = p_s / (R_{H_2O} * T) \quad \text{in kg/m}^3$$

$$R_{H_2O} = 461,4 \text{ J/kg/K} \text{ Gaskonstante des Wasserdampfes}$$

$$\{J/kg/K\} = \{Nm/kg/K\} = \{kg*m/s^2 * m/kg/K\} = \{Pa*m^2*m/kg/K\}$$

T die absolute Temperatur in Kelvin

Stoffübergang von Wasserdampf bei freier Konvektion

Die Abgabe von Wasserdampf aus einem Bauteil in die Luft des Raumes kann als Stoffübergang von Wasserdampf bei freier Konvektion modelliert werden. Bei unbeheizten Räumen oder solchen, die nur sporadisch beheizt werden, ist die Temperatur-Differenz zwischen Raumluft und Oberfläche im Tagesgang gering. Dann geschieht der Stoffübergang bei quasi konstanten Temperaturen, beispielsweise vom Fußboden in die Raumluft oder von einer Wand in den Innenraum. Im Grenzfall ist der Diffusionswiderstand durch alle Schichten der Bauteile vernachlässigbar.

[Brauer 1971] beschreibt den Stoffübergang bei freier Konvektion. Unter freier Konvektion wird die Bewegung eines Fluids durch Dichte-Unterschiede verstanden. Sie tritt auf, wenn Unterschiede der Dichte des Wasserdampfs an der Grenzfläche und im Kern der Raumluft bestehen. Die Dichte in der Übergangs-Zone ist meist eine Funktion der Temperatur. Sie kann aber auch in isothermen Situationen durch Unterschiede der Dichte selbst bestimmt sein. Dies wäre der Fall bei unterschiedlicher Luftfeuchte, so kann die Oberfläche des Bauteils gesättigt sein oder einen Film flüssigen Wassers tragen.

Bezogen auf den Fußboden eines unbeheizten Gebäudes wird der Übergang von Wasserdampf in die Raumluft auch durch die sich fortlaufende Änderung der Temperatur und relativen Luftfeuchte in der Raumluft beeinflusst. Der Tagesgang dieser Parameter ist wesentlich vom Eintrag von solarer Strahlungswärme bestimmt. Stoffübergang und Wärmeübergang sind oft gekoppelt. Vereinfachend werden Grenzfälle des Stoffübergangs betrachtet.

[Brauer 1971] beschreibt den Stoffübergang mit den dimensionslosen Kennzahlen. Der Massenstrom der Feuchte \dot{M}_{H_2O} durch die Bezugsfläche A - z. B. der Fläche des Fußbodens A_{Boden} - wird mit dem Stoffübergangskoeffizienten β gebildet.

$$\dot{M}_{H_2O} = \beta / (R_{H_2O} * T) * A_{Boden} * (p_{H_2O,Boden} - p_{H_2O,Raumluft}) \quad (Gl. 6.9)$$

\dot{M}_{H_2O} Massenstrom der Feuchte

A_{Boden} durchströmte Fläche (Fußboden)

$p_{H_2O,Boden}$ Partialdruck des Wasserdampfes

$R_{H_2O} = 461,4 \text{ J/kg/K}$ Gaskonstante des Wasserdampfes

Einheit $\{J/kg/K\} = \{Nm/kg/K\} = \{kg*m/s^2 * m/kg/K\} = \{Pa*m^2 * m/kg/K\}$

T die absolute Temperatur in Kelvin

Die Dichte des Wasserdampfes wird aus dem Wasserdampfteildruck p_{ist} mit dem idealen Gasgesetz berechnet.

$$\text{Dichte Wasserdampf } \rho_{H_2O} = p_{ist} / (R_{H_2O} * T)$$

Damit ergibt sich nach Umformung

der **Massenstrom der Feuchte aus dem Fußboden:**

$$\dot{M}_{H_2O} = \beta * A_{Boden} * (p_{H_2O,Boden} - p_{H_2O,Raumluft}) \quad (Gl. 6.9, A)$$

Mit folgenden Kennzahlen beschreibt [Brauer 1971] den **Stoffübergangskoeffizienten β** für den Stoffübergang bei freier Konvektion an ebenen, waagerechten Platten, die laminar oder turbulent angeströmt werden:

$$\begin{aligned} > \text{Sh} & \text{ Sherwood-Zahl} & \text{Sh} & = \beta * L / D & (Gl. 6.1) \\ & X & L & \text{ Länge der Platte, charakteristische Abmessung} \end{aligned}$$

- X L auch als hydraulischer Durchmesser ($4 \cdot \text{Fläche} / \text{Umfang}$)
- X D Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft
- Gr Grashof-Zahl formuliert für unterschiedliche Anwendungen
- Sc Schmidt-Zahl $Sc = \nu / D$ (Gl. 2.172)
- X ν kinematische Viskosität der feuchten Luft
- Ra Rayleigh-Zahl $Ra = Gr \cdot Sc$ (Gl. 6.45)
- Ra Rayleigh-Zahl $Ra = Gr \cdot Pr$ (Gl. 6.43) hier verwendet
- Pr Prandtl-Zahl $Pr = \eta \cdot c_p / \lambda$ (Gl. 1.18)
- X η dynamische Viskosität der feuchten Luft
- X c_p spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft
- X λ Wärmeleitfähigkeit der feuchten Luft

Ist die freie Konvektion auf **Temperaturunterschiede** zurück zu führen, so ist die Grashof-Zahl für Gasgemische folgendermaßen definiert:

$$Gr = g \cdot L^3 / (\nu)^2 \cdot (T_{H_2O, \text{Boden}} / T_{H_2O, \text{Raumluft}} - 1) \quad (\text{Gl. 6.33})$$

Ist die freie Konvektion in Gasgemischen eine Folge von **Konzentrationsunterschieden**, dies sei eher selten der Fall, dann ist die Grashof-Zahl definiert durch

$$Gr_K = g \cdot L^3 / (\nu)^2 \cdot (\mu_{\text{Luft}} - \mu_{H_2O}) / (\rho \cdot R \cdot T) \cdot (\rho_{H_2O, \text{Boden}} - \rho_{H_2O, \text{Raumluft}}) \quad (6.38)$$

$\mu_{\text{Luft}} - \mu_{H_2O}$ die Molmassen von Luft und Wasser

R allgemeine Gaskonstante $8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

$\rho_{H_2O, \text{Boden}}$... Wasserdampf-Partialdruck

Empirische Beziehungen stellt [Brauer] für den Wärme- und Stoffübergang an der Oberseite einer horizontal angeordneten Platte (Gl. 6.57, 6.58) zusammen. Untersucht wurde an Platten in einer weiten Umgebung. Dabei hat sich ein Strömungsfeld ausgebildet, das sich weit über die Abmessungen der Platte erstreckt.

Diese Bedingungen sind in den Innenräumen nicht erfüllt.

Auch wenn sich im begrenzten Raum das Strömungsfeld verengt, wird hier angenommen, dass eine **Abschätzung der Größe des Massenstroms der Feuchte aus dem Fußboden** möglich sei.

Wenn die Temperatur der Grenzfläche größer ist als die Temperatur der Luft $T_{H_2O, \text{Boden}} > T_{H_2O, \text{Raumluft}}$ - so gelten

$$Sh = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \quad \text{für } 1 \cdot 10^5 < Ra < 2 \cdot 10^7 \quad (\text{Gl. 6.57})$$

$$Sh = 0,14 \cdot Ra^{1/4} \quad \text{für } 2 \cdot 10^7 < Ra < 3 \cdot 10^{10} \quad (\text{Gl. 6.58})$$

Findet der Wärme- und Stoffübergang bei einer niedrigeren Temperatur der Grenzfläche statt $T_{H_2O, \text{Boden}} < T_{H_2O, \text{Raumluft}}$ - so gilt die empirische Beziehung (Gl. 6.59):

$$Sh = 0,27 \cdot Ra^{1/4} \quad \text{für } 3 \cdot 10^5 < Ra < 3 \cdot 10^{10} \quad (\text{Gl. 6.59})$$

Empirische Beziehungen gibt [Brauer 1971] für den Wärme- und Stoffübergang auch an senkrechten Platten an (Sherwood-Zahl und Nusselt-Zahl für einen weiten Bereich der Rayleigh-Zahl, Abschnitt 6.123).

Berechnungsmethode zum Wassertransport durch Konvektion

Der Wassertransport durch geöffnete Fenster und durch Fugen wird maßgeblich von der Umströmung des Gebäudes durch die Außenluft bestimmt. Der auf das Gebäude treffende Wind staut sich und wird umgelenkt. Vor dem Gebäude herrscht damit ein höherer Druck als dahinter. Die Windgeschwindigkeit am Gebäude bestimmt den Staudruck, der die Durchströmung des Gebäudes bewirkt.

Die Strömung der Außenluft im Bereich des Gebäudes unterliegt vielen Einflüssen der umgebenden Bebauung, der Windrichtung relativ zum Gebäude und der Höhe des Gebäudes. Die freie Windgeschwindigkeit selbst ist von der Höhe über Grund abhängig. Ihr Maximalwert wird erst einige hundert Meter über Grund erreicht.

[Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)] beschreiben den Einfluss der umgebenden Bebauung in einigen Diagrammen und Tabellen. Der Staudruck am Gebäude ist über die Höhe des Gebäudes stark unterschiedlich. Auch die Dachform und die Art und Position der Öffnung spielen eine Rolle. Eine Voraussage des Staudrucks bzw. der Luftgeschwindigkeit durch ein Fenster bei gegebener Windgeschwindigkeit ist mit ihren Daten nicht möglich.

Um zu quantitativen Aussagen zu kommen, werden mit einem Anemometer gelegentlich Geschwindigkeiten des Windes vor der Kirche und in den Fenstern gemessen. Der Vergleichswert des Außenbereichs sollte einer Stelle gemessen werden, an der Wind möglichst ungestört und frei weht. Folgende Datensätze zur Konvektion werden erhoben:

- die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung beim Gebäude vor Ausführung der Messung in den Fenstern
- Messung des Luftvolumenstroms an allen geöffneten Klappfenstern
- die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung nach Messung im Gebäude
- eine aktuelle Wettermeldung über Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Mit den Messwerten der Windgeschwindigkeit in der Nähe der Kirche und der Luftgeschwindigkeit in den geöffneten Klappfenstern werden Korrelationen zur Windgeschwindigkeit der benachbarten Wetterstation hergestellt.

Damit werden aus Datensätzen der Windgeschwindigkeit einer Wetterstation die örtliche Windgeschwindigkeit an den Fenstern und der Volumenstrom durch geöffnete Fenster für Tage und Monate abgeleitet.

Lüftung durch Fugen

Fugen bestehen an Fenstern bei den vier beweglichen Klappfenstern und an der Blei-Einfassung der gefärbten, kleinformatigen Glasscheiben. Die Glasscheiben wurden vor Jahrzehnten in Blei gefasst. Ein geringer Anteil im unteren Teil der Fenster ist undicht und hält einem Schlagregen nicht mehr stand. Die Blei-Einfassung scheint überwiegend dicht zu sein.

[Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)] beschreiben die Strömung durch die Fugen bei schlecht dichtenden Fenstern als turbulent. Bei turbulenter Strömung ist der Volumenstrom durch die Fugen proportional zur Wurzel aus dem Druckunterschied zwischen außen und innen $\sqrt{\Delta p}$.

Die laminare Strömung herrscht bei gut eingepassten Fenstern vor. Der Volumenstrom ist proportional zum Druckunterschied Δp .

Zitat aus [Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)]: „Bei Bauteilfugen liegt meistens ein Kombination der beiden Strömungsregime vor, und die Strömungsrate kann durch einen Potenzansatz dargestellt werden (Fugenströmungsgesetz). ... Bei Türen und Fenstern lässt sich der Luftvolumenstrom im bauphysikalisch relevanten Druckbereich mit Hilfe ... der Definition des **Fugendurchlasskoeffizienten** a_F darstellen:“

$$q_v = a_F \cdot l \cdot (\Delta p)^n$$

q_v Volumenstrom [m³/h]

a_F Fugendurchlasskoeffizient [m³ / (h * m * Pa^{2/3})]

l Länge der Fugen [m]

Δp Differenzdruck über die Fuge [Pa]

n Exponent der Druckdifferenz [-] → Bei folgenden Daten ist $n = 2/3$

[Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)] berichten diese Fugendurchlasskoeffizienten a_F für Fenster und Haustüren:

Konstruktion	m ³ /(h*m*Pa ^{2/3})
Ältere Fenster mit Holzrahmen ohne Dichtung, ältere Holztüre ohne Dichtung	0,6
Fenster mit Holz- oder kombiniertem Metall/Holzrahmen, mit einer Dichtung (SIA 180 (1999)), Türen mit Dichtung	0,22 - 0,44
Fenster mit Metall-, Kunststoff- oder Holzrahmen mit besonderer Dichtung (SIA 331 (2008)), Türen mit besonderer Dichtung	0,2
Moderne Fenstersysteme mit Falz- und Überschlagsdichtungen, Messungen reiner Fugenverluste	<0,01
Fugendurchlässigkeit der schwachen Beanspruchungsgruppe A der DIN 18055 bzw. entsprechende Luftdurchlässigkeit Klasse 2 nach DIN EN 12207:2006-06. Institut für Fenstertechnik, Rosenheim, FA_GW_0203: Ulrich Sieberath. Klassifizierungs-Werte, bezogen auf Fugenlänge und umgerechnet in Formel mit Exponent 2/3, für Δp 10 -150 Pa	0,38 - 0,45

Tabelle Fugendurchlasskoeffizienten

Für die Kirche in Breitfurt werden diese Fugendurchlasskoeffizienten a_F angesetzt:

Flügel der Klappfenster und Portal, ohne Dichtung $0,6 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{2/3})$

Festverglasung in Blei-Einfassung

- die Verglasung mit Kitt in den Bleiprofilen ist teilweise brüchig, daher etwas besser als ältere Holztüre ohne Dichtung:

Gewählter Ansatz $0,6 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{2/3})$

Für die Durchströmung wird angenommen, dass jeweils die gegenüberliegenden Fenster durchströmt werden und damit einen Strömungswiderstand in Serienschaltung bilden. Der Differenzdruck über beide Fenster zusammen wird über die am Gebäude anliegende Druckdifferenz gebildet.

Die am Gebäude anliegende Druckdifferenz kann aus der Windgeschwindigkeit am Gebäude abgeschätzt werden.

Maximal könnte sich der Staudruck aus der Strömung einstellen. Er wird aus dem Quadrat der mittleren Luftgeschwindigkeit in Richtung auf das Fenster und der Dichte der Luft berechnet. Den maximalen Staudruck mindern örtliche geometrische Verhältnisse des Gebäudes und seiner Umgebung (Abb. 4.10 [Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)]). Die örtlichen Verhältnisse der Umströmung werden mit dem Widerstandsbeiwert c_P bewertet. Der Widerstandsbeiwert c_P überstreicht den Wertebereich $0,1 - 1,0$.

Siehe Kapitel „Umrechnung von Stationsdaten auf örtliche Windgeschwindigkeit“.

Der Widerstandsbeiwert wird mit einem Maximalwert von $1,0$ angenommen.

Die Windgeschwindigkeit in Richtung auf die Gebäudefugen wird als identisch mit der Luftgeschwindigkeit in den geöffneten Klappfenstern angenommen.

$$\Delta p_K \text{ Differenzdruck über die Kirche} = c_P \cdot \rho_{\text{Luft}} / 2 \cdot W_{\text{Mittel,Fenster, Wind}}^2$$

Der Volumenstrom der Luft durch die Fenster ergibt:

$$q_V = \sum (a_F \cdot l) \cdot (\Delta p_K)^{2/3} = \sum (a_F \cdot l) \cdot (c_P \cdot \rho_{\text{Luft}} / 2 \cdot W_{\text{Mittel,Fenster, Wind}}^2)^{2/3}$$

Die Luft, die von außen die Fugen der Kirche durchströmt, passiert die Luv-Seite und die Lee-Seite. Die Fugen auf der Luvseite werden als parallel geschaltete Strömungswege addiert. Ebenso für Lee. Seriell geschaltet sind die Fronten von Luv und Lee. Da die Kirche symmetrisch angeordnete Fenster hat, sind die Luv- und Lee-Seite identisch. Das Strömungsgesetz für die Widerstände bzw. Durchlässigkeit $D_{\text{ges}} = \sum (a_F \cdot l)$ durch beide Fenster-Fronten lautet

$$1 / D_{\text{ges}}^{3/2} = 1 / D_{\text{Luv}}^{3/2} + 1 / D_{\text{Lee}}^{3/2}$$

Die Serienschaltung von gleichen Durchlässigkeiten auf der Luv- und Lee-Seite vermindert den Volumenstrom durch die Fenster-Fugen um 37% .

Aufgrund der Unsicherheit der Größe der abgeschätzten Luftgeschwindigkeit auf das Gebäude wird vereinfacht der

Volumenstrom der Fugenlüftung wie folgt berechnet:

$$q_V = \sum (a_F \cdot l) \cdot (c_P \cdot \rho_{\text{Luft}} / 2 \cdot W_{\text{Mittel,Fenster, Wind}}^2)^{2/3}$$

Daten der Windgeschwindigkeit der nächst liegenden Wetterstation ermöglichen, den Volumenstrom der Fugenlüftung für alle Wetter-Situationen zu berechnen.

Daten der Fenster:

Tabelle Abmessungen der Fenster

Bauteil	Abmessungen	Fläche je Fenster	Länge Fugen je Fenster
Kirchenfenster	8 Stück, Höhe bis Scheitel 3,2m, 0,95m Breite.	3,0 m ²	
Festverglasung mit farbigen Glasscheiben	Je Fenster 2-mal 4 Module mit je 16 Scheiben – je 15cm Höhe, 11cm Breite. Glasfläche als Modul zu 16 Scheiben in Blei gefasst. Stahl-Rahmenwerk vertikal einmal und quer viermal. Ohne Fugen des Klappfensters ohne Dichtungen.		35,3 m
Fenster-Front mit farbigen Glasscheiben	Wirksame Länge der Fugen der Fenster bei Durchströmung von Luv nach Lee		Je Front: 4 * 35,3 m = 141,4 m
Klappflügel	4 Stück, ersetzen je ein Modul fester Verglasung		4 * 2,0 m = 8,0 m
Portal	Massive zweiflügelige Holztür ohne Dichtungen.		7,2 m

Tabelle Gewählte Daten für Fugendurchlasskoeffizienten und Fugenlängen

Bauteil	Beschreibung, Merkmal	Fugendurchlasskoeffizient a_F $m^3 / (h * m * Pa^{2/3})$	Fugenlänge l m	$a_F * l$ m
Fensterflügel	vier Stück, von Hand bedient, ohne Dichtung, Metallrahmen	0,6	8,0	4,8
Portal	schwere zweiflügelige Holztür, ohne Dichtung	0,6	7,3	4,4
Festverglasung	in Blei gefasst, Blei teils ohne Kitt, mit Stahlträgern	0,6	282,8	169,7
Gesamte Fugen Summe $a_F * l$				178,8

Differenzdruck des Windes über das Kirchengebäude

Mit dem Differenzdruck des Windes über dem Gebäude wird der Beitrag der Fugenlüftung zur Feuchte-Bilanz der Kirche abgeschätzt.

Der Wind zeigt sich in einem Feld von Windgeschwindigkeit und Windrichtung durch die natürliche Strömung der Luft. Hindernisse wie Bäume, Gebäude oder Siedlungen, auf die der Wind trifft, führen zu starken Änderungen des Strömungsfeldes. In jedem Fall baut sich bei Umströmung eines Gebäudes ein Differenzdruck über das Gebäude auf. Der Differenzdruck bestimmt maßgeblich die Konvektion durch das Gebäude.

Allerdings wird der Differenzdruck über das Kirchengebäude nicht gemessen. Stattdessen wird die Windgeschwindigkeit einer benachbarten Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes DWD herangezogen. Verfügbar sind von der Messstation 66131 Saarbrücken-Ensheim (SDO_ID 4336) diese Messwerte:

- ✓ Tagesmittel der mittleren Windgeschwindigkeit in ca. 10 m Höhe in m/s
- ✓ Tageswert der maximalen Windgeschwindigkeit in ca. 10 m Höhe in m/s
- ✓ Stündliche Stationsmessungen der Windrichtung in ca. 10 m Höhe in Grad
- ✓ Stündliches Mittel der Windgeschwindigkeit in ca. 10 m Höhe in m/s

Aus den Tagesdaten soll die maßgebliche Windgeschwindigkeit an der Kirche errechnet werden und sodann der Differenzdruck. Diese Befunde werden herangezogen:

1. Korrelation der Windgeschwindigkeit des DWD mit der örtlichen Luftgeschwindigkeit im geöffneten Klappfenster der Kirche
2. Korrelation der Windgeschwindigkeit des DWD mit der örtlichen Luftgeschwindigkeit in der Nähe der Kirche

Der Differenzdruck wird aus der Luftgeschwindigkeit senkrecht zu Gebäudefugen berechnet. Als maßgebliche Geschwindigkeit wird die Luftgeschwindigkeit im geöffneten Klappfenster der Kirche angenommen.

Näheres im Kapitel „Messungen der Luftgeschwindigkeit von Wind und im Fenster“.

Die angedeuteten Unsicherheiten der Methode zur Berechnung der Fugenlüftung lassen orientierende Abschätzungen des Feuchtestromes zu.

Wetter-Daten des DWD

Den online Zugang zu den freien Klimadaten des DWD ermöglicht das Climate Data Center CDC <https://cdc.dwd.de/portal/> - Wichtige Schritte zur Abfrage von Daten einer Wetterstation:

1. unter Rubrik Werkzeuge die Schaltfläche CDC-Suche
2. Seite „Daten suchen“ hat links eine Leiste zur Eingrenzung der Suche. Hier unter dem blau hinterlegten Balken mit der Aufschrift Zugriff das Wort „Interaktiv“ anklicken, bei Datenherkunft die Stationsdaten (66131 Saarbrücken) anklicken, bei Parameterklasse z. B. den Niederschlag, bei Parameter die Niederschlagshöhe, bei Statistischer Bearbeitung Tageswert und Zeitreihe
3. im mittleren Bereich unter Überschrift “Produkte suchen“ (Achtung: winzige Buchstaben) die Stadt/PLZ auswählen und im nächsten Auswahlfeld suchen.



4. Im rechten Bereich ein blau markierte Schaltfläche „Produkt suchen“ anklicken. Es öffnet sich die Kartenansicht von Deutschland. Menüleiste rechts hilft beim zoomen und einen Orts-Punkt mit der Maus anfahren und den Namen im Popup feststellen. Diesen anklicken zur Auswahl der Station. In der Menüleiste die Anzeige in der Karte auf die gewählte Station begrenzen (Kreisförmiges Symbol). Dann noch den Zeitraum unter „Zeitbereich von/bis“ den „Zeitraum von“ usw. eingeben.
5. Mit dem Zahnrad in der Zeile „Zusammenfassung Stationsmessungen“ die Art der Datei bestimmen und für große Datenmengen die eigene E-Mail-Adresse eingeben.
6. Ganz wichtig ist es, in der Zusammenfassung der Stationsmessungen vor die Zeile mit dem gewünschten Parameter ein Häkchen zu setzen. Achtung direkt daneben (winziges Symbol) das Symbol Download anklicken. Damit wird eine ZIP- Verzeichnis mit Dateien herunter geladen.

Im ZIP-Verzeichnis die Datei im Verzeichnis data öffnen (EXCEL) und extrahieren. Die Datentabelle enthält eine Spalte mit komma-getrennten Daten.

In einzelne Spalten unter Register „Daten“ in der Menügruppe „abrufen und transformieren“ bzw. Tool-Gruppe „Datentools – Text aus Tabelle“ „aus Tabelle“ wählen. Es öffnet sich der Abfrage-Editor (EXCEL 2016). Dort wählen „Spalte teilen“, „nach Trennzeichen“, „Komma“. Die Spalte „Wert“ markieren und mit der Schaltfläche „Weitere Textimporteinstellungen“ das Dezimaltrennzeichen auswählen. Schließlich „Schließen und laden“ erstellt ein neues Tabellenblatt mit den aufgetrennten Daten. Dort die Überschriften anpassen.

Umrechnung von Stationsdaten auf örtliche Windgeschwindigkeit

Die Ausführungen von [Zürcher, Ch.; Frank, Th. (2018)] sind teilweise im Kapitel „Berechnungsmethode zum Wassertransport durch Konvektion“ beschrieben.

Zu den örtlichen Geschwindigkeits-Profilen des Windes schreibt [Zürcher 2018]:

In der 500m bis 1000m mächtigen untersten Luftschicht, auch atmosphärische Grenzschicht genannt, wird die geostrophe Strömung (ungestörte, laminare Windgeschwindigkeit in oberen Luftschichten) durch Reibung an der Erdoberfläche gebremst. Das dadurch entstehende Höhenprofil der Windgeschwindigkeit $w(z)$ lässt sich u. a. durch folgenden Potenzansatz beschreiben:

$$w(z) / w(z_{ref}) = (z / z_{ref})^\alpha$$

$w(z)$	Geschwindigkeit in der Höhe z
$w(z_{ref})$	Geschwindigkeit in der Referenz-Höhe
α	Exponent, abhängig von Umgebung

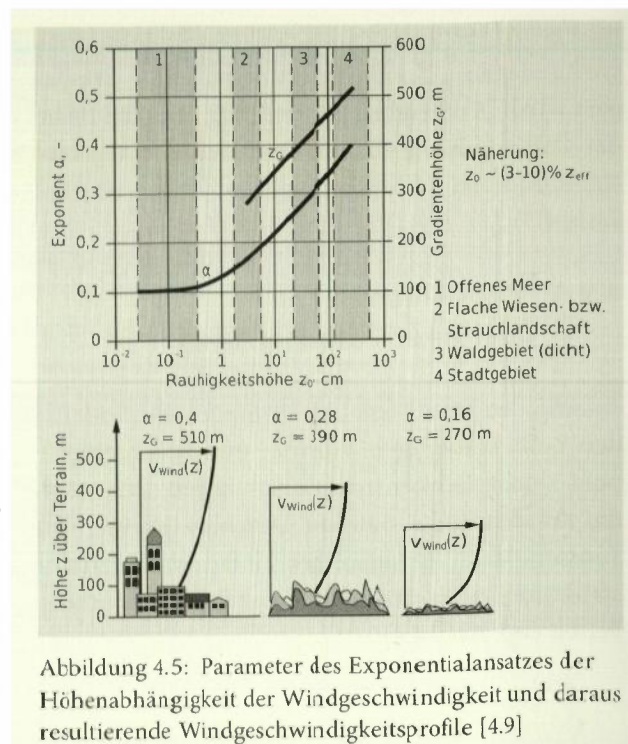
Das Geschwindigkeits-Profil eines Ortes hängt von der Rauigkeit der Umgebung ab und ist mit dem Exponent α und der Geschwindigkeit in der Referenz-Höhe $w(z_{ref})$ gekennzeichnet. Benachbarte Orte mit unterschiedlicher Erdoberfläche zeigen die gleiche Wind-Geschwindigkeit in der Referenz-Höhe.

Bei bekannter Gradienthöhe (z_{ref}) - eine hauptsächlich durch die Bodenrauigkeit bestimmte Höhe, in der der Wind die geostrophe Windstärke (ungebremste Windgeschwindigkeit w_{ref}) erreicht – kann der Gradientwind (w_{ref}) direkt aus Windgeschwindigkeitsmessungen in Bodennähe ermittelt werden oder umgekehrt. Üblicherweise werden in der Meteorologie Windgeschwindigkeiten für eine Referenzhöhe von 10 m über Grund angegeben.

Zur Umrechnung von Daten der Meteo-Station auf einen benachbarten Ort ist der Ort nach seiner Rauigkeit einzuschätzen.

Die Wetterstation befindet sich auf einer un bebauten Hochfläche des Flughafens Saarbrücken-Ensheim (flache Wiese). Aus der Abbildung 4.5 Parameter des Exponentialansatzes wird bei mittlerer Rauigkeit ein Exponent 0,16 und eine Grenzschichthöhe von 270m abgelesen.

Die Kirche befindet sich in bebauter Ortslage mit zwei-geschossigen Gebäuden. Aus der Abbildung 4.5 Parameter des Exponentialansatzes wird am unteren Rand des Bereiches Stadt ein Exponent 0,35 und eine Grenzschichthöhe von 470m abgelesen.



Um aus der Windgeschwindigkeit an der Wetterstation die Windgeschwindigkeit an der Kirche in Höhe des Klappfensters zu ermitteln, lässt sich die Formel 4.6 nach [Zürcher 2018] heran ziehen. Bei benachbarten Orten wird die gleiche Gradientwind wehen. Über diese gleiche Windgeschwindigkeit in der Grenzschichthöhe werden die unterschiedlichen Profile verbunden.

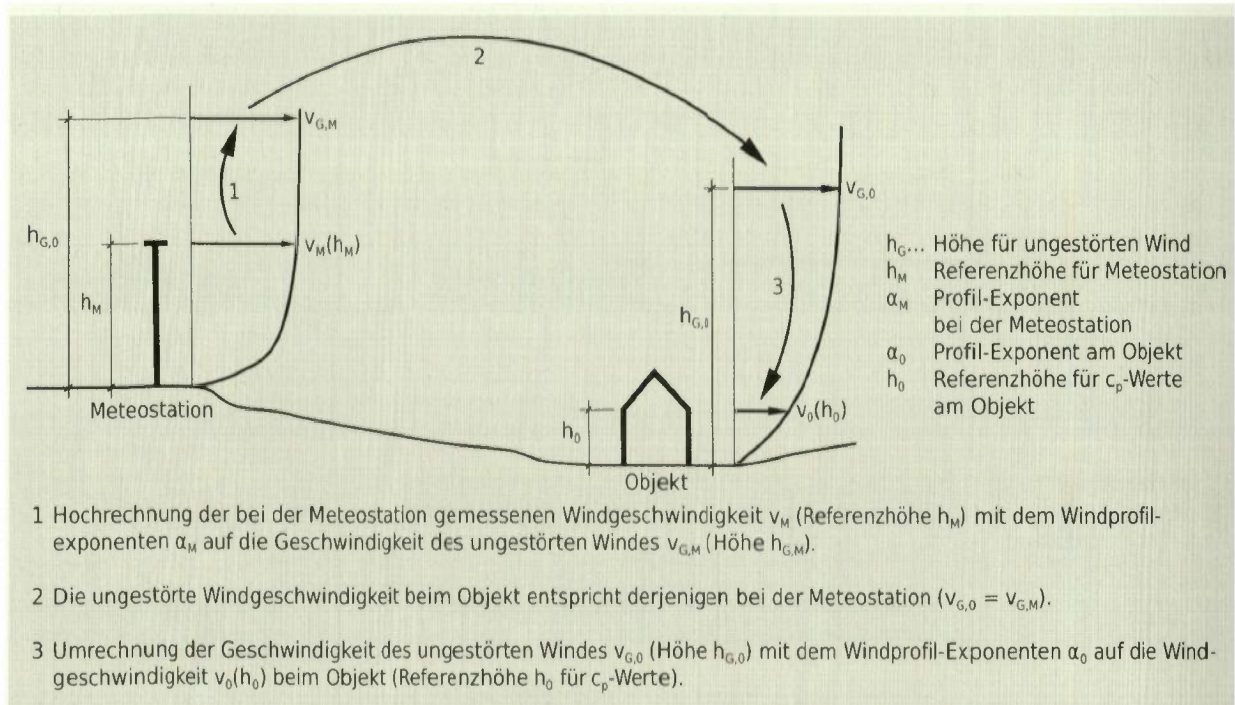


Abbildung 4.6: Anpassung der am Standort der Meteostation gemessenen Windgeschwindigkeit an den Standort des zu untersuchenden Gebäudes via die transferinvariante, geostrophe Windgeschwindigkeit

Rechenvorschrift nach [Zürcher 2018] also:

$$w(z_{ref}) = \{ w(z) / (z / z_{ref})^\alpha \}_{Ort A} = \{ w(z) / (z / z_{ref})^\alpha \}_{Ort B}$$

$$w(z) = \{ w(z_{ref}) * (z / z_{ref})^\alpha \}_{Ort B}$$

Es ergibt sich: aus einer Windgeschwindigkeit der DWD-Messtation für die Höhe des Klappfensters eine reduzierte Geschwindigkeit von 10 m/s auf 3,2 m/s:

Tabelle Umrechnung Windgeschwindigkeit

Tabelle Umrechnung Windgeschwindigkeit	Meteo-Station	Kirchen-fensterflügel	+2m über Niveau Straße
Höhe über Grund z [m]	10	4,07	1,95
Art Gelände	Wiese	Stadt, Dorf	Stadt, Dorf
Gradientenhöhe zG [m]	270	470	470
Exponent a	0,16	0,35	0,35
Beispiel-Wert w [m/s]	10	Dies entspricht 2,78 km/h.	
Windgeschwindigkeit [m/s] Grenzschicht zG	16,9	16,9	16,9
$w(z_{ref}) = \{ w(z) / (z / z_{ref})^\alpha \}_{Ort A}$			
Windgeschwindigkeit Kirche [m/s]		3,21	2,48
$w(z) = \{ w(z_{ref}) * (z / z_{ref})^\alpha \}_{Ort B}$			
Faktor w-Ort = f * w-Meteo	f =	0,321	0,248

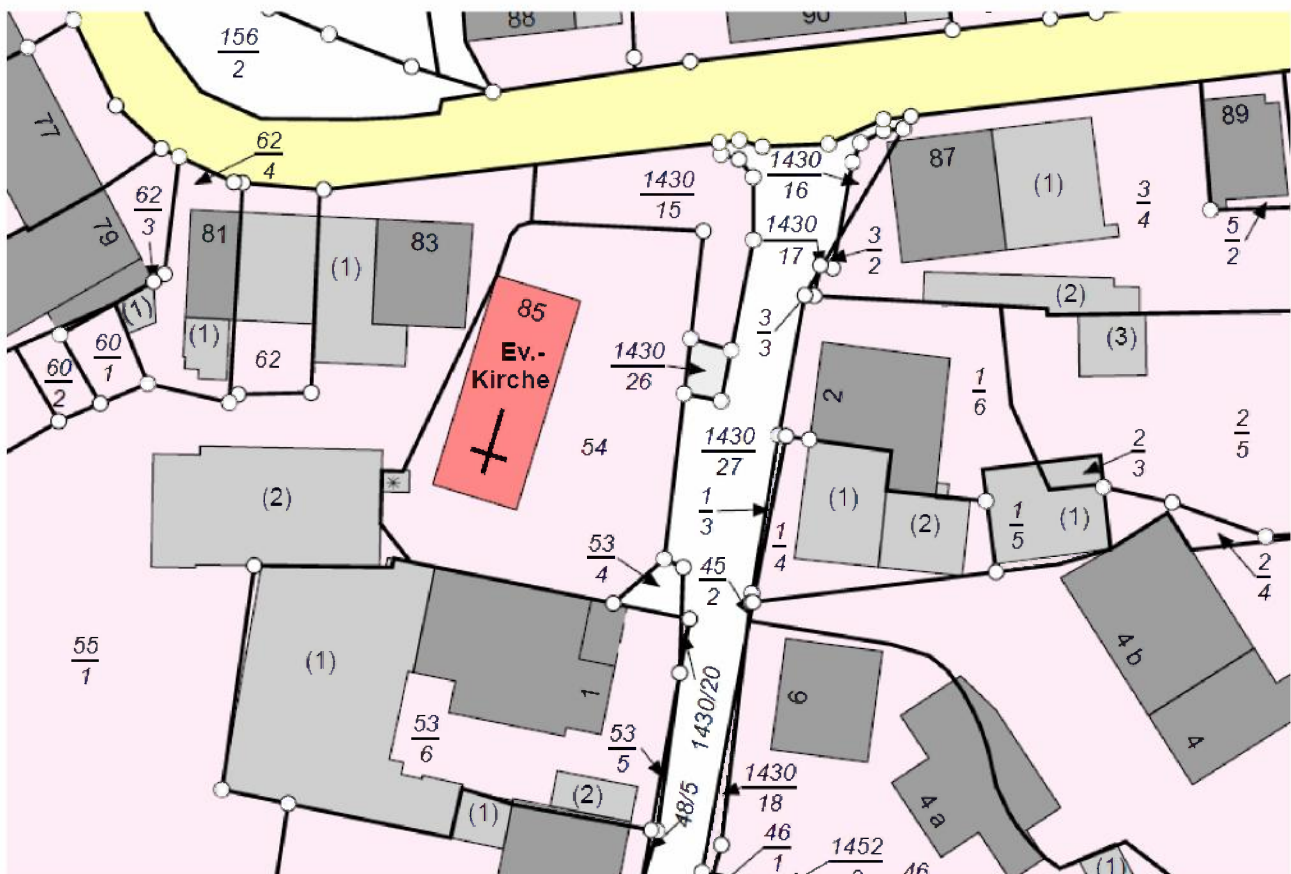
Neben der Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der betrachteten Höhe über Grund ist die Richtung des Windes von Bedeutung. Wenn der Wind senkrecht auf eine Wand des Gebäudes trifft, bildet sich der maximale Staudruck aus. Weht der Wind parallel zum Gebäude, ist der Druck auf beiden Seiten gleich und der Staudruck damit Null.

Der **Vektor der Windgeschwindigkeit** senkrecht zu einem Kirchenfenster ist aus den meteorologischen Messdaten zu ermitteln.

Die örtliche Windgeschwindigkeits-Komponente senkrecht zum Fenster wird errechnet aus den Stundenwerten der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung der benachbarten Wetter-Messstation, den Höhen über Grund und des Einflusses der Bebauung.

Die Ausrichtung der Fensterachsen gegen Nord wird aus dem Lageplan bestimmt.

Auszug aus dem Liegenschaftskataster – Blieskastel, Gemarkung Breitfurt, erstellt am 28.05.2019



Der obige Katasterauszug ist nach Nord ausgerichtet. Folgende Größen sind spezifiziert:

- α Winkel von Nord zur Längsachse der Kirche: 17 Grad östlich
- $\alpha + 90^\circ$ bzw. $\alpha + 180^\circ$ Winkel der Fensterachsen gegen Nord, rechtwinklig zur Längsachse: 107 bzw. 287 Grad. Maximalwert der Windgeschwindigkeits-Komponente zum Fenster
- ω Windrichtung der Messstation Saarbrücken-Ensheim in 10-Grad-Schritten von Nord im Uhrzeigersinn. Die Windrichtung ist die Himmelsrichtung, aus der der Wind kommt.

γ Winkel der Windgeschwindigkeits-Komponente zum Fenster

$$\gamma = \omega - \alpha$$

Windgeschwindigkeits-Komponente senkrecht zum Fenster w_F

$w_F =$ Windgeschwindigkeit Messstation Ensheim * Sinus γ * f_{Meteo}
 berechnet mit Sinus von Windrichtung und Himmelsrichtung des Kirchenfenster
 und Höhen-Umrechnung f_{Meteo}

Der **Staudruck** am Fenster berücksichtigt auch den Widerstandsbeiwert der Bebauung:

$$\Delta p = c_P * \rho_{\text{Luft}} / 2 * (w_F)^2$$

c_P Widerstandsbeiwert, abhängig von der Bebauung

ρ_{Luft} Dichte der Luft

w_F Windgeschwindigkeit in Höhe des Fensters,
 senkrecht zur Fensterfläche, berechnet aus $w(z)$ und Windrichtung

Die Ausführungen von [Zürcher 2018] zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Örtlichkeit. Die Bebauung der Umgebung wird den Staudruck in der Regel verringern. Es werden Widerstandsbeiwerte c_P im gesamten Bereich von 0,1 bis 1 berichtet.



Mit örtlichen Messungen der Geschwindigkeit wird ein Abgleich des Widerstandsbeiwerts herbei geführt.

Das Bild zeigt die enge Bebauung – ein niedriger Wert des Widerstandsbeiwerts wird angenommen (ca. 0,25).

Kirche Breitfurt:
 Bild aus Czerwinski, M.; Ziegler, M. (1995): Das Kirchenlexikon der Pfalz. Kaiserslautern.

Fensterlüftung

Die Kirche Breitfurt hat kein Lüftungssystem. Die natürliche Lüftung geschieht über Klappfenster, die in der gleichen geodätischen Höhe eingebaut sind. Thermische Effekte wie Kaminwirkung spielen damit keine Rolle.

Der konvektive Stofftransport errechnet sich aus dem Volumenstrom der freien Lüftung durch die Fenster und der Differenz der Feuchte von Außen und Innen.

Der Volumenstrom durch die Fenster $\tilde{V}_{\text{Fenster}}$ errechnet sich aus der Geometrie und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Luft durch das Fenster.

Die Luft-Geschwindigkeit in einem geöffneten Fenster wird mit einem Anemometer im Mittelpunkt der durchströmten Fläche gemessen. Die Messwerte der Luftgeschwindigkeit zeigen eine starke Böigkeit an. Daher scheidet eine Messung an mehreren Stellen des Öffnungsquerschnitts aus. Eine mittlere Geschwindigkeit wird über die Messdauer gebildet. Die Messdauer beträgt mindestens sechs Minuten. Der Deutsche Wetterdienst mittelt die Windgeschwindigkeit über zehn Minuten.

Aus der Luft-Geschwindigkeit in einem geöffneten Fenster $w_{\text{Ist,Fenster}}$ wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Luft $w_{\text{Mittel,Fenster}}$ berechnet. Nach [Brauer (1971) ... Einphasen- und Mehrphasenströmungen] ist das Geschwindigkeits-Profil bei turbulenter Strömung flach. Das Verhältnis der maximalen Geschwindigkeit in der Mitte der durchströmten Querschnittsfläche zur mittleren Geschwindigkeit ist

$$w_{\text{max}} / w = 0,5 * (1 + n) * (2 + n) \quad \text{mit } n = 1,225 (= 1/7) \text{ für Reynoldszahlen } 10^4 - 10^5$$

$$w_{\text{Mittel,Fenster}} = w_{\text{Ist,Fenster}} / \{0,5 * (1 + n) * (2 + n)\}$$

$$\tilde{V}_{\text{Fenster}} = A_{\text{Fenster}} * w_{\text{Mittel,Fenster}}$$

A_{Fenster} durchströmte Fläche des Fensters in m^2

$w_{\text{Ist,Fenster}}$ gemessene Geschwindigkeit in der Mitte der Fläche in m/s

$w_{\text{Mittel,Fenster}}$ Geschwindigkeit der Luft im Fenster als Mittelwert in m/s

Mit meteorologischen Mittelwerten des Windes kann der mögliche Lüftungs-Volumenstrom $\tilde{V}_{\text{Fenster}}$ abgeschätzt werden. Die mittlere Geschwindigkeit der Luft im Fenster wird aus gemessenen meteorologischen Daten der nächsten Wetter-Messstation abgeleitet. Dazu wird die Windgeschwindigkeits-Komponente senkrecht zum Fenster w_F herangezogen, die in einem vorstehenden Kapitel beschrieben ist.

Mit gemessenen Daten der Feuchte in und außerhalb der Kirche wird der austretende Massenstrom der Feuchte $\dot{M}_{\text{H}_2\text{O}}$ (in kg/s) errechnet.

$$\dot{M}_{\text{H}_2\text{O}} = (\rho_{\text{H}_2\text{O,innen}} - \rho_{\text{H}_2\text{O,außen}}) * \tilde{V}_{\text{Fenster}}$$

Die Dichte des Wasserdampfes wird aus dem Wasserdampfdruck p_{ist} mit dem idealen Gasgesetz berechnet.

$$\text{Dichte Wasserdampf } \rho_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{ist}} / (R_{\text{H}_2\text{O}} * T) - \text{in } \text{kg/m}^3$$

$R_{\text{H}_2\text{O}} = 461,4 \text{ J/kg/K}$ Gaskonstante des Wasserdampfes

Einheit $\{\text{J/kg/K}\} = \{\text{Nm/kg/K}\} = \{\text{kg} * \text{m/s}^2 * \text{m/kg/K}\} = \{\text{Pa} * \text{m}^2 * \text{m/kg/K}\}$

T die absolute Temperatur in Kelvin

Berechnung der mittleren Geschwindigkeit der Luft im geöffneten Fenster:

Aus Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit und Windrichtung der nächst gelegenen Wetter-Messstation des Deutschen Wetterdienstes wird der Differenzdruck des Windes berechnet, der aufgrund der Strömung des Windes um das Gebäude sich einstellt.

Der Differenzdruck des Windes ist gleich dem Druckverlust der Strömung Δp_F durch das Fenster auf der Luv-Seite und den beiden Fenstern auf der Lee-Seite bzw. umgekehrt.

$$\Delta p = \Delta p_F = \zeta * \rho_{Luft} / 2 * (w_{Mittel,Fenster})^2 + 2 * \zeta * \rho_{Luft} / 2 * (w_{Mittel,Fenster} / 2)^2$$

ζ Widerstandsbeiwert
 ρ_{Luft} Dichte der Luft
 $w_{Mittel,Fenster}$ Windgeschwindigkeit durch das Fenster

Der Widerstandsbeiwert ist für die Abschätzung des Volumenstroms die entscheidende Größe. Bekannt sind die Widerstandsbeiwerte für Bauteile in Rohrleitungen. Ähnlich wie in einer Rohrleitung ein Krümmer die Strömung umlenkt, wird auch in einem Klappfenster die Strömung umgelenkt. Das Fenster öffnet um eine horizontale Achse und gibt einen oberen und einen unteren Querschnitt teilweise frei. Der Fensterflügel ist um etwa 20° gegen die Vertikale geneigt. Die Querschnittsflächen im Fenster bilden sich aus den Flächen zwischen Rahmen und Flügel. Oben und unten sind rechteckige Querschnittsflächen, dagegen an den Seiten haben sie eine dreieckige Form. In Analogie zu Krümmern handelt es sich beim Klappfenster um eine scharfkantige Umlenkung um etwa 70°.

[Brauer, Heinz (1971): Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen] berichtet Werte des Widerstandsbeiwerts für kleinste Durchmesser-Verhältnisse von Krümmung zu Rohr von etwa 0,18 bis 0,25 bei turbulenter Strömung.

Zur Abschätzung des Volumenstroms kann auch das Modell der Ausfluss-Strömung aus einem großen Becken durch eine kleine Öffnung herangezogen werden. Je nach Formgebung füllt der Ausfluss-Strahl den Öffnungsquerschnitt nur zum Teil aus. Dies wird durch eine Kontraktionszahl μ abgebildet. Bei scharfkantiger Ausführung wird eine Kontraktionszahl $\mu = 0,61$ berichtet.

Die allgemeine Literatur zur Strömungslehre liefert keine genaueren Hinweise. Daher sind orientierende Messungen der Luft-Geschwindigkeit im geöffneten Fenster und die Messwerte für die Windgeschwindigkeit unerlässlich.

Gewählt wird hier ein Widerstandsbeiwert ζ von 0,5

$$\Delta p = \Delta p_F = \zeta * \rho_{Luft} / 2 * (w_{Mittel,Fenster})^2 + 2 * \zeta * \rho_{Luft} / 2 * (w_{Mittel,Fenster} / 2)^2$$

$$w_{Mittel,Fenster} = \{ 2*2/3 * \Delta p_F / (\zeta * \rho_{Luft}) \}^{1/2}$$

Lüftungsanlagen

[DIN EN ISO 13789] wird zur Berechnung der Konvektion durch geöffnete Fenster und durch Fugen herangezogen. Anhang C gibt Hinweise zu Luftvolumenströmen bei maschineller Lüftung.

Wesentlich ist die Luftwechselrate natürlicher Lüftung unter Berücksichtigung der Art und Geometrie des Gebäudes sowie der Größe und Anordnung der Öffnungen.

Die Luftwechselrate wird auch bestimmt durch die Lage des Gebäudes: Für *Gebäude mittlerer Höhe in Stadtzentren und Gebäude in Wäldern* wird starke Abschirmung nach Tabelle C.4 angesetzt. Gemäßigte Abschirmung dagegen für *Gebäude auf dem Land, von Bäumen oder anderen Gebäuden umgeben, Vororte*.

Die gemäßigte Abschirmung ist für die Dorfkirche in innerörtlicher Lage zutreffend: Die Abschirmungskoeffizienten e nach Tabelle C.4 betragen $e = 0,07$ für mehr als eine exponierte Fassade und $e = 0,02$ für eine exponierte Fassade (starke Abschirmung $e = 0,04$ bzw. $0,01$). $f = 20$ bei einer exponierten Fassade, sonst 15.

Die Gebäudedichtheit wird nach den drei Stufen niedrig, mittel und hoch klassifiziert und entspricht bei einem Einfamilienhaus der Luftwechselrate n_{50} bei 50 Pa den Werten >10 , 4 bis 10 und <4 h^{-1} , beim Mehrfamilienhaus den halben Werten.

Zur Bestimmung der natürlichen Lüftung geben Tabelle C.2 und C.3 bei mittlerer Abschirmung und mittlerer Dichtheit die Luftwechselrate n von $0,6$ h^{-1} für Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser, bei denen mehr als eine Fassade der Witterung ausgesetzt ist. Bei niedriger Dichtheit sind die Werte $1,1$ h^{-1} bzw. $0,9$ h^{-1} .

Typische Werte für die hygienische Mindestlüftung, wenn ein Gebäude genutzt wird, sind bei Wohngebäuden der Volumenstrom $V_{min} = 0,3$ h^{-1} * belüftetes Volumen, bei Nichtwohngebäuden pro Person ein Volumenstrom von 30 m^3/h .

Exkurs

Bei maschineller Lüftung kann der gesamte Volumenstrom V_{ges} nach Anhang C.5 mit einer empirischen Gleichung für große, windinduzierte Druckunterschiede für ganze Jahre bestimmt werden.

$$V_{ges} = (V_{Ventilator} + V_x) * \beta + (1 - \beta) * (V_0 + V_x)$$

V_x ist der zusätzliche Luftvolumenstrom, der durch Wind durch Lüftungsöffnungen und bei undichter Gebäudehülle hervorgerufen wird.

$$V_x = V_{ges} * n_{50} * e / (1 + f/e [(V_1 - V_2) / (V_{ges} * n_{50})]^2)$$

V_1 Zuluftvolumenstrom,

entspricht dem gesamten Volumenstrom V_{ges} bei System mit nur Belüftung

V_2 Abluftvolumenstrom, der entwichene Luftstrom,

entspricht dem gesamten Volumenstrom V_{ges} bei System mit nur Entlüftung

V_0 der Luftstrom bei natürlicher Lüftung, einschließlich des Luftstroms durch das Kanalnetz eines maschinellen Lüftungssystems

β Zeitanteil eingeschalteter Ventilatoren

Physikalische Modelle zum Wassertransport in Bauteilen

Der Wassertransport in Bauteilen geschieht durch verschiedene Mechanismen. Feuchtetransport lässt sich unterscheiden in Transport von Wasser in der Gasphase und als Flüssigkeit.

Ein wichtiger Transportvorgang ist die Diffusion von Wasserdampf in Bauteilen. Die Diffusion erfolgt in der Gasphase in der Porenstruktur relativ trockener Stoffe, wie Holz, Gips, Ziegel. Physikalisch wird die Diffusion mit Gesetzen nach Fick beschrieben. Planerisch kann die Diffusion mit dem Rechenverfahren nach Glaser beschrieben werden. Sie ist in der Norm [DIN 4108-3] „Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung“ niedergelegt.

Flexibler sind die Planungsmethoden nach [DIN EN ISO 13788:2013-05] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnern – Berechnungsmethoden.

Der Wassertransport von einer Seite eines Bauteils durch das ganze Bauteil zur anderen Seite wird auch als Permeation bezeichnet. Im Unterschied dazu wird die Aufnahme von Wasserdampf in einem Stoff als Sorption bezeichnet und die Abgabe oder Trocknung als Desorption bezeichnet.

Transportvorgänge bei hohem Wassergehalt im Baustoff und bei Sättigung der Porenstruktur mit flüssigem Wasser sind beispielsweise:

1. Oberflächendiffusion: Wassermoleküle diffundieren in dünner Schicht auf Porenwandungen. Dieser Vorgang ist stets mit der Dampfdiffusion gekoppelt. Dazu sind durchgehende Porenräume erforderlich. Beispiele sind poröse Stoffe mit großer innerer Oberfläche in mäßig feuchtem Zustand, z. B. Sandstein, gebrannter Ton, Papier. Oberflächendiffusion wird nach [Kilian 2013] mit der relativen Luftfeuchte korreliert.
2. Kapillarer Wassertransport aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers und des Randwinkels des porösen Baustoffes, der die Benetzbarkeit ausdrückt. Flüssiges Wasser fließt durch kapillaren Unterdruck in poröse, wasserbenetzbare Stoffe wie Gips, Ziegel oder Kalkstein ein, wenn diese in relativ trockenem Zustand mit flüssigem Wasser in Berührung kommen.
3. Laminare Sickerströmung von flüssigem Wasser in voll gefüllten, groben Poren, das infolge von Druckunterschieden der Gravitation fließt – beschreibbar mit dem Gesetz von Darcy.
4. Elektrokinetischer Wassertransport bei einem angelegten Gleichspannungs-Feld – beschreibbar mit einem abgewandelten Gesetz nach Darcy.

Wesentliche Merkmale der Transportvorgänge sind beschrieben von [Klopfer, H. (1974)] und [Kilian, R. (2013)].

Neue Berechnungsverfahren für den Wasserdampftransport sind im Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und als Software WUFI erhältlich, die neben der Diffusion auch andere Transportvorgänge abbilden können.

WUFI® (**W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär) ist eine Software-Familie zur realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen.

Zitat aus dem Web <https://wufi.de/de/software/was-ist-wufi/>

Ein bisher gängiges Verfahren zur Beurteilung des Feuchtehaushalts eines Bauteils durch Betrachtung des auftretenden Diffusionstransports stellt das Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 dar. Dieses Verfahren berücksichtigt jedoch weder den kapillaren Feuchtetransport im Bauteil, noch dessen sorptive Aufnahmefähigkeit für ausfallende Feuchte. Ferner kann das mit stationären Zuständen unter pauschalen Blockrandbedingungen arbeitende Verfahren weder kurzfristige Ereignisse abbilden, noch Regen und Strahlung berücksichtigen.

*Das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelte und an Freiland- und Labordaten weltweit validierte Rechenverfahren WUFI® (**W**ärme **u**nd **F**euchte **i**nstationär) erlaubt die realitätsnahe Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen. WUFI® basiert auf den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigtransport in Baustoffen. Es arbeitet sowohl mit Standardstoffkennwerten als auch mit einfach zu bestimmenden Speicher- und Flüssigtransportfunktionen.*

Als Randbedingungen können gemessene Außenklimawerte einschließlich Schlagregen und Sonneneinstrahlung verwendet werden, wodurch sich das Verhalten mehrschichtiger Bauteile, zweidimensionaler Anschlüsse und sogar mehrzonaler Gebäude unter Einfluß natürlicher Bewitterung realistisch untersuchen läßt.

WUFI® Light ist eine kostenfreie, aber auch im Funktionsumfang eingeschränkte Version von WUFI® Pro. Die Lizenz hat eine Laufzeit von 4 Wochen. Sie ermöglicht die thermische und hygrische Simulation an einem Regelquerschnitt für einen Standort.

Beispielsweise ließe sich der Feuchtetransport aus dem erdberührten Fußboden in der Flußaue der Blies und der Fundamentmauern simulieren. Die Fußböden sind teils mit dichtem Kalkstein und teils mit Eichenparkett belegt. Die Größe und die jahreszeitliche Verteilung der aufsteigenden Feuchte aus den Fußböden könnte eine Abschätzung des erforderlichen Lüftungsbedarfs ermöglichen.

Ausgleichsfeuchte und Sorptionsisotherme

Poröse Stoffe nehmen Wasser bis zu einem Gleichgewichtszustand auf, wenn sie in einer Umgebung mit feuchter Luft stehen. Wenn die relative Luftfeuchte konstant bleibt, stellt sich in den Hohlräumen des Stoffes ein hygroskopisches Gleichgewicht des Feuchtegehalts ein.

Feuchtegehalt u :

Verhältnis der Masse des Wassers zu Masse des trockenen Stoffs (kg/kg)

Die Ausgleichsfeuchte eines Baustoffes soll den Feuchtegehalt angeben, der sich in einem Gebäude nach einiger Zeit einstellt. [Duzio 2020] gibt folgende massebezogene Ausgleichsfeuchte an, die sich auf DIN 4108-4:2007-06 Tabelle 4 mit 50 % relativer Luftfeuchte und 20°C bezieht:

Baustoff	Feuchtegehalt u [kg/kg]	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte %	Quelle
Beton mit geschlossenem Gefüge und mit porigen Zuschlägen	0,13	20	50	Duzio 2020
Gips, Anhydrit	0,02	20	50	Duzio 2020
Zementestrich	0,02			Duzio 2020
Holz, Holzwerkstoffe, Fichte/Tanne im bewitterten Außenbereich	0,18	20	50	Duzio 2020
Holz, Holzwerkstoffe, Fichte/Tanne im unbeheizten und nicht bewitterten Bereich	0,15	20	50	Duzio 2020
Holz, Holzwerkstoffe, Fichte/Tanne im beheizten Innenbereich	0,09	20	50	Duzio 2020
Holz (Werte aus Diagramm einer Sorptionsisotherme)	0,08 0,11 0,148	20 20 20	40 60 80	Zürcher 2018
Eiche radial (Werte aus Diagramm einer Sorptionsisotherme)	0,04 m ³ /m ³ 0,07 0,09 0,11		20 50 65 80	www.masea-ensan.de abgerufen am 29.04.2022
Eiche radial – u_{80} Sorption	115 g/m ³		80	s. o.

Die Ausgleichsfeuchte ist ein Punkt auf der Sorptionsisotherme.

Die Sorptionsisotherme stellt den Zusammenhang von ansteigendem Feuchtegehalt mit steigender relativer Luftfeuchte dar – genau bei der Aufnahme von Wasser. Bei der Abgabe von Wasser, bei der Desorption, kann eine Hysterese beobachtet werden.

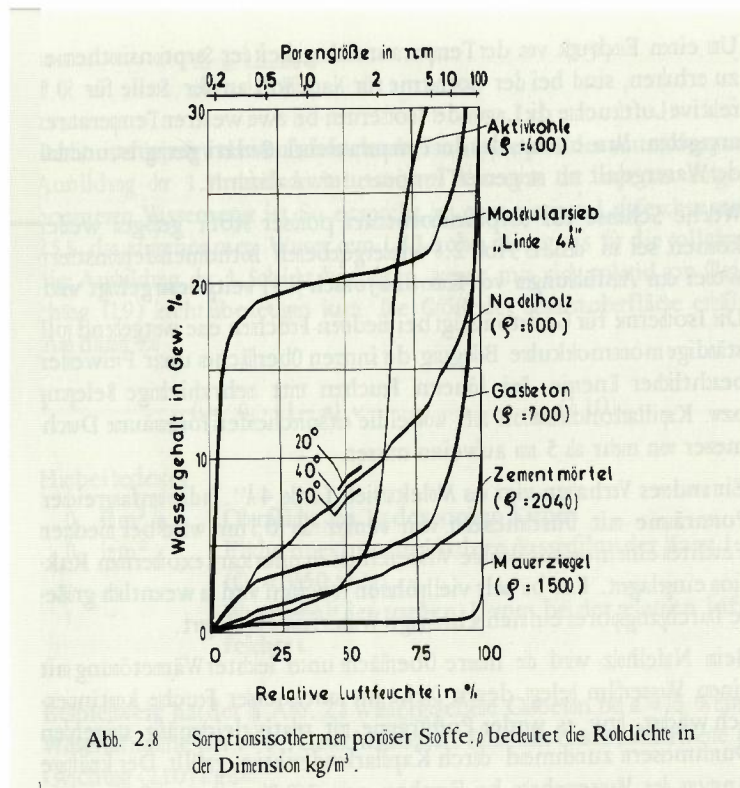
Die Sorptionsisotherme hat nur sehr geringe Abhängigkeit von der Temperatur. Dies zeigt das Diagramm einer Sorptionsisotherme nach [Zürcher 2018] und nach [Klopfer 1973] – siehe folgende Seite.

Bei der Aufnahme von Feuchte werden die inneren Oberflächen des Stoffes – die Poren – bei geringer relativer Feuchte mit einer Schicht von Wassermolekülen belegt, bei höherer Feuchte mit mehreren Lagen von Wassermolekülen belegt.

[Zürcher 2018] schreibt, dass in diesem relativ trockenen Bereich der Wassertransport den Gesetzen der Dampfdiffusion unterliegt.

„Bei noch höheren Feuchten werden Wasserinseln ausgebildet, und der Dampftransport wird durch die einsetzende Kapillarkondensation behindert und bei weiterer Feuchtezunahme durch leistungsstärkere Mechanismen wie Kapillarleitung abgelöst.“ ...
 „Im überhygroskopischen Bereich – also in Kontakt mit flüssigem Wasser – findet sich ungebundenes Wasser in Kapillar- und Makroporen (Porenradien $>10^{-7}$ m).“

Siehe Kapitel „Diffusionskoeffizient und Feuchtegehalt“, in dem der Einfluss auf den Wassertransport in Bauteilen durch Oberflächendiffusion quantifiziert wird.



Beispiele für Sorptionsisothermen nach [Klopfer 1973]:

Der Feuchtegehalt eines Bauteiles in einem Bauwerk wird die Schwankungen der relativen Luftfeuchte abbilden. So müsste sich bei hoher Luftfeuchte ein hoher Feuchtegehalt einstellen.

Der Feuchtegehalt eines Baustoffes im eingebauten Zustand kann als Indikator für die vorherrschende Luftfeuchte dienen.

Dynamisches Feuchtespeichervermögen (Nordtest-Verfahren)

Die praktische Auswirkung der Sorption kann ein Test in einer Klimakammer zeigen. Darin wird eine definierte Materialfläche einer periodischen Änderung der Luftfeuchte ausgesetzt. Im Nordtest-Verfahren wird die Probe acht Stunden bei einer hohen relativen Luftfeuchte von 75% gehalten und 16 Stunden bei einer niedrigen Feuchte von 33%. Die Feuchte-Aufnahme und -Abgabe einer definierten Materialfläche wird gravimetrisch gemessen.

Nach [Zürcher 2018] wird im eingeschwungenen Zustand die dynamische Feuchtespeicherkapazität bestimmt, angegeben als Moisture Buffer Value MBV. Der MBV gibt die abgegebene bzw. aufgenommene Masse der Feuchte in einem Zyklus bezogen auf die Fläche der Probe und bezogen auf die Änderung der relativen Feuchte (75%-33%). Ein mittelmäßige Feuchtespeicherfähigkeit wird Werten des MBV von 0,5 bis 1,0 g/ (m² * % r.F.) zugeschrieben.

Dazu gehören Gipskartonplatte, Calciumsilikatplatte und Maschinengipsputz.

Eine bedingte Feuchtespeicherfähigkeit wird Werten des MBV von 0,2 bis 0,5 g/ (m² * % r.F.) zugeschrieben:
Sanierputz, Rotkalkputz, Sumpfkalkputz.

Einen Überblick gibt eine Abbildung in [Zürcher 2018]

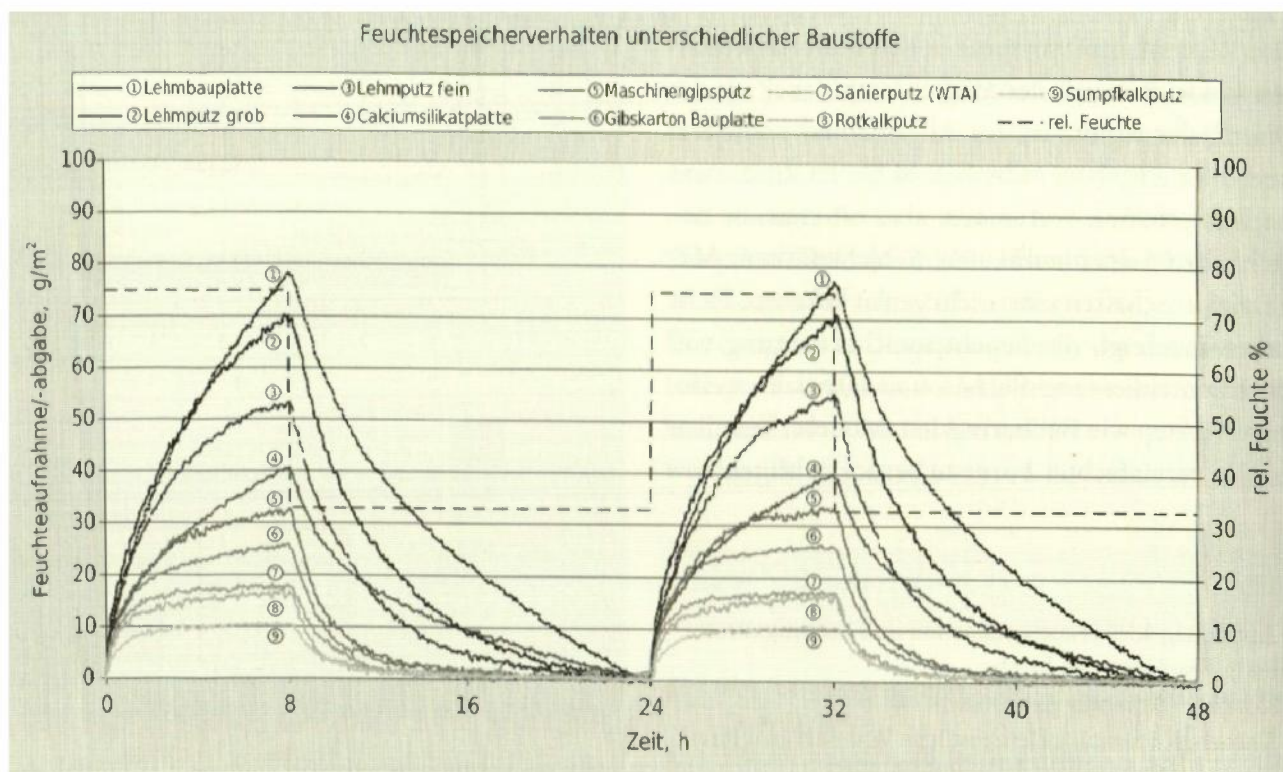


Abb. 4.19: Masseänderung von Baustoffen im Nordtest-Verfahren [4.27]

Die tägliche Änderung des Wassergehaltes von Putzen in Räumen kann damit abgeschätzt werden.

Berechnungsmethoden zum Wassertransport durch Diffusion

[DIN 4108-3:2001-07] wird zur orientierenden Berechnung des Wasserdampftransports durch alle äußeren Bauteile verwendet.

[DIN EN ISO 13788:2013-05] könnte zur genaueren Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinnern und der Trocknung herangezogen werden.

Die Methode [DIN EN ISO 13788] dient zur Abschätzung der Massenströme von Wasserdampf. Sie ermöglicht, die „*jährliche Feuchtebilanz*“ zu ermitteln und die „*Höchstmenge an akkumulierter Feuchte infolge Tauwasserbildung im Bauteilinnern*“ zu berechnen. „*Die Methode ist zur Beurteilung anzuwenden und weniger als ein Instrument der genauen Vorhersage. Es eignet sich ... für die Beurteilung der Auswirkungen von Modifikationen.*“

Die Methoden beider Normen berücksichtigen nicht die Schwankungen der Materialeigenschaften in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, die kapillare Saugwirkung und Transport von Wasser in der flüssigen Phase in Baustoffen und hygroskopisches Verhalten von Baustoffen.

Die Methoden gehen von stationären Bedingungen während einer Periode bzw. eines Monats aus. Sie folgt damit dem Monatsbilanzverfahren zur Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden nach DIN 4108.

Um lediglich für den Fall reiner Wasserdampf-Diffusion bei gegebenen Bedingungen in einem Raum die Größe des **Feuchte-Transports** zu berechnen, wird nach **[DIN 4108-3]** Anhang A die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g berechnet:

$$g = \Delta p / Z \quad [\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})]$$

Δp Differenz des Wasserdampfdrucks [Pa] über alle Schichten des Bauteils

Z Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand [$\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$]

$$Z = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot (\mu_1 \cdot s_1 + \dots + \mu_n \cdot s_n) \quad \text{für alle Schichten } 1 \dots n$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sum s_d$$

s_d wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]

μ Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-] nach DIN 4108-4 usw.

s geometrische Schichtdicke [m]

Der Größe Z liegt zugrunde der Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient von Luft bezogen auf den Dampfteildruck $\delta_0 = D / (R_D \cdot T) = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ mit dem Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten $D = 0,089 \text{ m}^2/\text{h}$ der spezifischen Gaskonstante für Wasserdampf und der absoluten Temperatur T

Zum **Feuchte-Transport** wird nach **[DIN EN ISO 13788, Kap. 6.2]** in ähnlicher Weise ebenfalls die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte g berechnet:

$$g = \delta_0 \cdot \Delta p / s_d \quad [\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad \text{mit } s_d = \sum \mu \cdot s \text{ über alle Schichten}$$

δ_0 Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient von Luft bezogen auf den Dampfteildruck
 $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
 entspricht dem Diffusionskoeffizienten $D = 0,083 \text{ m}^2/\text{h}$

Beide Berechnungsmethoden entsprechen sich und weisen nur einen geringfügigen Unterschied im Ergebnis aus, wie die Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten zeigen.

[Zürcher 2018] erweitert das Konzept um den Widerstand von Bauteilschichten. Das **Maximum des Wasserdampf-Transports** aus einem Bauteil an die Umgebung stellt sich bei praktisch fehlendem Widerstand in den Bauteilschichten aus. Begrenzend ist hierfür nach [Zürcher 2018] der Wasserdampfübergangskoeffizient β .

Der Dampfübergang an einer Oberfläche berechnet sich als Wasserdampf-Stromdichte g

$$g = \beta * \Delta p \quad [\text{kg} / (\text{m}^2 * \text{s})]$$

Δp Differenz des Wasserdampfdrucks [Pa] zwischen feuchter Oberfläche und Kern der Umgebungsluft

$$\beta_i = 120 \text{ mg} / (\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa})$$

im Innenraum bei einer Temperatur von 10-20°C und einer Differenz zwischen Oberfläche und Luft von 5-10K

$$\beta_a = 120 \text{ mg} / (\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa})$$

außen bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s und Temperatur von -20 ... 30°C

Vollständige Beziehung für den Wasserdampf-Transport nach [Zürcher 2018]

$$g = \Delta p / (1/\beta_i + Z + 1/\beta_a)$$

Die angegebenen Bedingungen beziehen sich offensichtlich auf beheizte Räume. Bei unbeheizten Räumen oder solchen, die nur sporadisch beheizt werden, ist die Temperatur-Differenz zwischen Raumluft und Oberfläche wesentlich geringer. Dann geschieht der Stoffübergang bei quasi konstanten Temperaturen. Dies ist Stoffübergang bei freier Konvektion aufgrund von Unterschieden der Dichte des Wasserdampfs an der Grenzfläche und im Kern der Raumluft.

Zum Umrechnung des Wasserdampfübergangskoeffizienten nach [Zürcher]

g	Massenstrom/Fläche $g = \Delta p / (1/\beta_i + Z + 1/\beta_a)$	$\text{kg} / (\text{m}^2 * \text{s})$
Δp	Differenz des Wasserdampfdrucks zwischen feuchter Oberfläche und Kern der Umgebungsluft	Pa
β_z	Wasserdampfübergangskoeffizient [Zürcher] 120 $\text{mg} / (\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa})$	$\text{mg} / (\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa})$
$g = \dot{M}_{\text{H}_2\text{O}} / A_{\text{Boden}}$	$\dot{M}_{\text{H}_2\text{O}} = \beta / (R_{\text{H}_2\text{O}} * T) * A_{\text{Boden}} * (p_{\text{H}_2\text{O},\text{Boden}} - p_{\text{H}_2\text{O},\text{Raumluft}})$ (Gl. 6.9)	
$p_{\text{H}_2\text{O},\text{Boden}}$	Partialdruck des Wasserdampfes	Pa

Wenn der Stoffübergang nur in der Grenzschicht auftritt, so sind andere Anteile zu vernachlässigen und mit dem Ansatz nach Zürcher wird der mit Brauer vergleichbare Wasserdampfübergangskoeffizient bestimmt:

$$\text{Massenstrom } g = \Delta p * \beta_z = \Delta p * \beta / (R_{\text{H}_2\text{O}} * T)$$

Umrechnen von β_z in β

$$\begin{aligned} \rightarrow \beta &= (R_{\text{H}_2\text{O}} * T) * \beta_z \rightarrow (461,4 \text{ J/kg/K} * 280\text{K}) * \mathbf{120} \text{ mg} / (\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa}) \\ &\rightarrow 1,55 * 10^{+7} * \text{J} * \text{K} * \text{mg} / (\text{kg} * \text{K} * \text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa}) \\ &\rightarrow 1,55 * 10^{+7} * \text{Nm} * \text{K} * \text{mg} * \text{m}^2 / (\text{kg} * \text{K} * \text{m}^2 * \text{h} * \text{N}) \\ &\rightarrow 1,55 * 10^{+7} * 10^{-6} * \text{m/h} / 3600 \text{ s/h} \\ \beta &\rightarrow 4,31 * 10^{-3} \text{ m/s (aus Zürcher)} \end{aligned}$$

Exkurs – genauere Berechnung von Tau und Trocknung:

In die aufwendige Berechnung nach [DIN EN ISO 13788] zur genaueren Quantifizierung der Tauwasserbildung im Bauteilinnern und der Trocknung gehen ein:

- der Monatsmittelwert der außenseitigen Temperatur für Wände
- der Monatsmittelwert der außenseitigen Temperatur plus 2 K für die Dachdecke
- Temperatur nach der [DIN EN ISO 13788, 4.2.3b] für massive Böden auf Erdreich
- der Monatsmittelwert der außenseitigen Luftfeuchte, im Erdreich 100%
- die raumseitigen Monatsmittelwerte der Temperatur und Luftfeuchte

Die Berechnung nach [DIN EN ISO 13788] verläuft iterativ über alle Monate des Jahres und benötigt bestimmte Bedingungen für den ersten Monat der Rechenfolge. Im Rechengang sind stationäre Wärmeleitung und diffusiver Feuchte-Transport durch die Schichten des Bauteils gekoppelt. Das Temperaturgefälle wird über die einzelnen Grenzflächen und auch dazwischen (Abstand des Wärmedurchlasswiderstands $<0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) berechnet und der jeweilige Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfs berechnet. Verglichen wird an jeder Stelle der Sättigungsdampfdruck mit dem Dampfdruck, der sich aus der Diffusion einstellt. Tauwasserbildung an einer oder mehreren Stellen wird ermittelt und in den Folgemonaten hinsichtlich Akkumulation oder Trocknung berücksichtigt.

Diffusionskoeffizient und Feuchtegehalt

Der Feuchtegehalt beeinflusst auch den Diffusionskoeffizienten, mit dem der Transport von Wasserdampf durch Bauteile beschrieben wird. Im strengen Prinzip der Diffusion in der Gasphase einer luft-gefüllten Porenstruktur (Fick'sches Gesetz) ist der Diffusionskoeffizient unabhängig von der Feuchte.

Beobachtungen des Wasserdampf-Transports bei höherem Feuchtegehalt lassen sich auch mit dem genannten, einfachen, linearen Zusammenhang von Wasserdampf-Diffusionsstromdichte und Differenz der Partialdrücke des Wasserdampfes darstellen. Der erhaltene scheinbare Diffusionskoeffizient wächst nach [Klopfer 1974] stark an.

[Klopfer 1974] berichtet: *Untersuchungen an Sandstein, Kalkstein und verschiedenen Böden ... haben ... bei diesen Stoffen einen merklichen Einfluß der Oberflächendiffusion ab etwa {relativer Luftfeuchte} $a = 60\%$ festgestellt. Bei gewichtsbezogenen Wassergehalten von 20 Prozent überstieg der gesamte Wassertransport den durch Dampfdiffusion möglichen um 1 bis 3 Zehnerpotenzen.*

Untersuchungen an einem „Kalkstein ...“, der im Sättigungszustand einen Wassergehalt von 22 Gew. % aufwies. Ab einem Wassergehalt, der etwa $a = 60\%$ entspricht, nahm der scheinbare Diffusionskoeffizient in starkem Maße zu, wobei die Zunahme etwa proportional zur dritten Potenz des Wassergehaltes war.“

... „der Wassertransport erfolgt in porösen Stoffen, welche sich im Gleichgewicht zu natürlichen Luftfeuchtigkeiten ($50\% \sim a \sim 100\%$) befinden, in der Regel nach Gesetzen, welche sich aus dem Zusammenwirken von Dampfdiffusion und Oberflächendiffusion ergeben.“

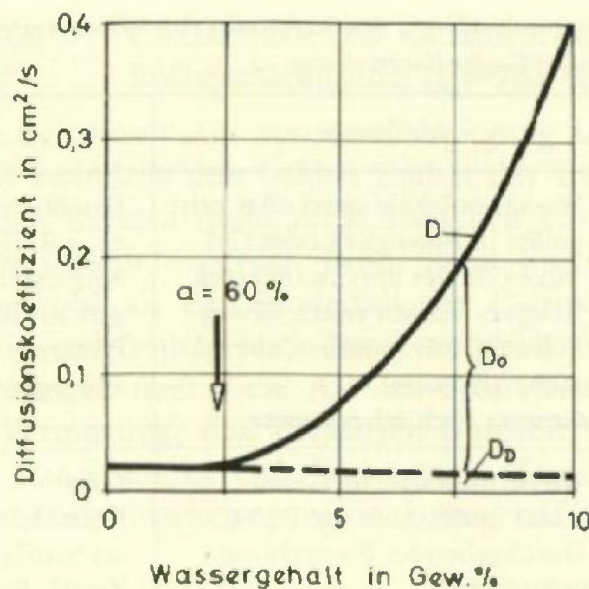


Abb. 3.18 Der scheinbare Diffusionskoeffizient für den Wassertransport in Kalkstein in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Kalksteins

Beschreibungen zur Bausubstanz

Zur Lage der Kirche siehe: Katasterplan der Kirche Breitfurt.

Ein Luftbild der Kirche siehe: Kirche Breitfurt, Luftbild aus Czerwinski, M. und Ziegler, M.

Sanierung des Putzes in 1999

Hersteller des Material des Sanierputzes war nach Auskunft eines Mitarbeiters sehr wahrscheinlich Remmers. Diese Angabe sollte ausreichen, um das Produktdatenblatt mit den bauphysikalischen Daten zu finden. Heutige Sanierputze und Sanier-Systeme von Remmers weisen Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ von etwa 15 auf.

Der Mitarbeiter meint, dass auch eine horizontale Bohrlochsperr die Diffusion von Wasserdampf in den Kirchenraum stark verringern würde und dass die Kosten in einem Rahmen liegen, der vergleichbar mit anderen Lösungen wäre.

Fotos der behobenen Schäden des Putzes auf der Innenseite und Außenseite zeigen, dass sie bis zu einer Höhe von 1 m reichen.

Dach und Fußboden

Die Erneuerung des Dachstuhls und der Decke in 1999 umfassen unter anderem:

- X 140,5 m² Gipskartondecke einschl. Unterkonstruktion an der neuen Holzbalkendecke anbringen
- X Klemmfilzbahnen WLG 035, 180 mm stark geliefert und verlegt
- X Dampfsperre zu vor, winddichte Ausführung auf vorhandene Deckenbalken geliefert und befestigt

Holzbohlen auf Dachdecke, rauhe Schalung 24 mm 7,80x 19,20 m

Der Fußboden des Kirchensaals ist im Mittelgang und um den Altar mit Kalkstein belegt, unter den Kirchenbänken mit Holzparkett. Laut Rechnung der Firma Brodinger GmbH vom 28.03.2000 wurden rund 5 m² „Marmor Comblanchien“ geliefert und im Dickbett an Reparaturstellen verlegt. Insgesamt wurden 54 m² alter Steinbelag gereinigt. „Marmor Comblanchien“ ist ein feinkörniger, beiger Kalkstein aus Burgund mit einer Porosität von 0,8 % und Dichte 2.670 kg/m³.

Der ZUB-Bauteilkalkulator weist in seinem Datenteil einen einzigen Marmor nach DIN EN ISO 10456 mit einem Wasserdampf-Diffusionswiderstandsfaktor von 10.000, Dichte von 2.800 kg/m³ und einer Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/m/K aus. Ein Kalkstein hoher Dichte von 2.600 kg/m³ ist dort genannt: DIN EN ISO 10456 Gestein Kalkstein, extrahart, mit Wasserdampf-Diffusionswiderstandsfaktor von 200 bis 250.

Der Holzfußboden im Kirchensaal wurde von Malerbetrieb Rudi Keller, Böckweiler, mit einer Parkettschleifmaschine abgeschliffen, farblos grundiert und zweimal mit Siegelack farblos versiegelt (66,7 m²).

Nicht bekannt ist die Unterkonstruktion des Holzfußbodens.

Im Zuge der Sanierung wurden neue Elektro-Zuleitungen zu den Bankheizkörpern gelegt

und die Installation des Niederspannungs-Schaltfeldes erneuert (Fa. Knoerr, Blieskastel, 03.07.2000). Die alte Elektro-Zuleitung war offensichtlich unter dem Parkettboden verlegt, an wenigen Stellen ist in einer Bohrung ein abgetrenntes mehradriges Kabel zu sehen.

Um den Transport von Wasserdampf aus dem Fußboden in den Kirchensaal abzuschätzen, soll der Massenstrom aus Diffusion berechnet werden.

- X die Baustoff-Schichten des Fußbodens sind noch zu erkunden - Bekannt sind die beiden oberen Schichten im Parkettboden – Eiche und Luftzwischenraum 20mm. Annahme darunter Beton und Schüttung. Der mit hartem Kalkstein belegte Boden hat wohl den gleichen Unterbau.
- X Temperatur unter dem Fußboden - Angaben zum Jahresgang der Temperatur des Bodens in Hamburg [Duzio 2020]. In einer Tiefe von 0,5m ist im Januar und Februar die Bodentemperatur +3°C und erreicht 17°C im Juli und August. Sie folgt dem Monatsmittelwert der Lufttemperatur und ist mit ihr in den kalten Monaten fast deckungsgleich. -
- X Entsprechend wird angenommen, dass auch die Unterkonstruktion des Fußbodens in der Kirche die mittlere Raumtemperatur annimmt.

Schimmelpilz

[Umweltbundesamt 2005] hat mit seiner Innenraumlufthygiene-Kommission einen Schimmelpilzsanierungs-Leitfaden herausgegeben. Wesentliche Zusammenhänge zum Keimen von Pilzsporen und zum Wachstum werden hier zitiert:

Der wichtigste Faktor für das Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden ist Feuchtigkeit.

Poröse, hygroskopische Stoffe können in Abhängigkeit von ihrer Porenstruktur und inneren Oberfläche unterschiedliche Mengen Wasser an sich binden. Sie stehen in Austausch mit der Feuchtigkeit der sie umgebenden Luft. ...

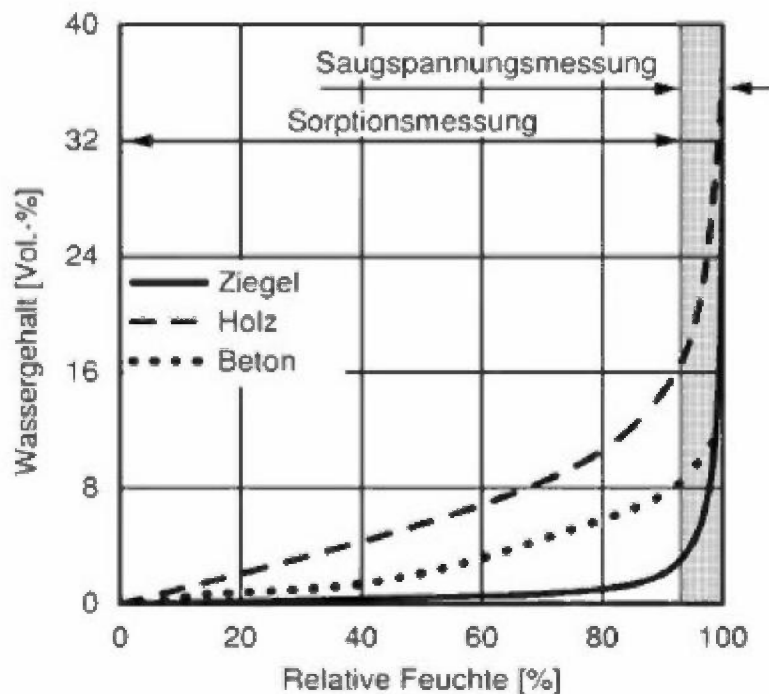


Bild 1: Typische Feuchtespeicherfunktionen für schwach (Ziegel), mäßig (Beton) und stark (Holz) hygroskopische Baustoffe. Die Feuchtespeicherfunktion kann bis 95 % relative Feuchte über Sorptionsmessungen bestimmt werden, darüber wird sie über Saugspannungsmessungen ermittelt (nach Krus 1995)

Das Erreichen eines Gleichgewichts bedeutet, dass der Wasserdampfdruck in den Poren des Materials der gleiche ist wie in der Umgebungsluft. In der Praxis lässt sich die Materialfeuchte daher durch die relative Luftfeuchte im Umgebungsbereich des Materials näherungsweise darstellen. Der Zusammenhang zwischen der Menge des eingelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird bei isothermen Verhältnissen durch die Sorptions-Isotherme charakterisiert. Bild 1 zeigt für drei unterschiedliche Materialien

(Beton, Holz und Ziegel) die Sorptionsisothermen, also den Wassergehalt der Materialien in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte. ...

Das entscheidende Kriterium für Keimung und Wachstum von Mikroorganismen ist das zur Verfügung stehende Wasser. Um zu erkennen, bei welchen raumklimatischen Randbedingungen mit Schimmelpilzbildung zu rechnen ist, muss man wissen, dass Schimmelpilze sowohl aus dem Substrat als auch aus der Luft Wasser bzw. Wasserdampf aufnehmen können.

Die Feuchtegrenze, unterhalb derer kein Wachstum von Schimmelpilzen auf Materialien stattfindet, liegt bei ca. 70 % relativer Feuchte an der Oberfläche. Mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei 80 % relativer Feuchte an der Oberfläche sind die Wachstumsbedingungen für fast alle innenraumrelevanten Schimmelpilzarten erreicht. Bei noch höheren Oberflächenfeuchten können alle Schimmelpilzarten sowie Bakterien wachsen.

Der Nährstoffgehalt des Substrats ist neben der Feuchtigkeit und der Temperatur eine weitere wichtige Einflussgröße für Schimmelpilzwachstum. In der Regel sind im Innenraum ausreichend Nährstoffe vorhanden.

Um den Einfluss der Nährstoffe zu berücksichtigen, teilt man die Isoplethensysteme in verschiedene Substratgruppen ein:

Substratgruppe O:

Optimaler Nährboden (z. B. Vollmedien); diese Isoplethensysteme gelten für die anspruchslosesten Wachstumsvoraussetzungen, also die niedrigsten Werte für die relative Feuchte. Sie bilden für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze die absolute Wachstumsgrenze.

Substratgruppe I:

Biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material.

Substratgruppe II:

Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen.

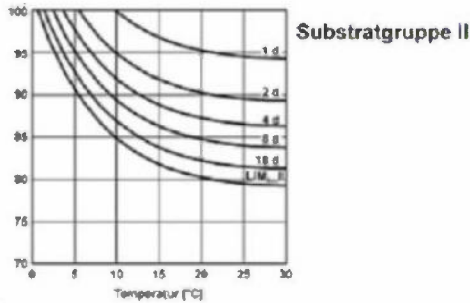


Bild A: Verallgemeinertes Isoplethensystem für die Sporenauskeimung, das für alle in Bauteilen auftretenden Pilze gilt (nach Sedlbauer 2001); Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für Substratgruppe II. Die angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist. LIM = Lowest Isopleth for Mould = unterste Grenze der Sporenauskeimung

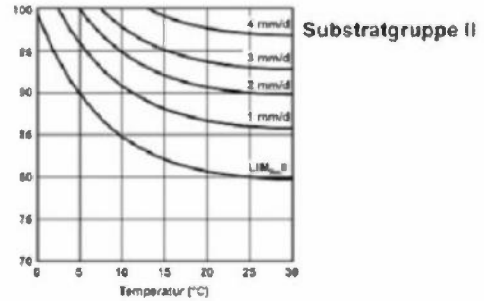


Bild B: Verallgemeinertes Isoplethensystem für das Myzelwachstum, das für alle in Bauteilen auftretenden Pilze gilt (nach Sedlbauer 2001); Bild oben gilt für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I und Bild unten für Substratgruppe II. Die angegebenen Werte in mm/d charakterisieren das zu erwartende Wachstum. LIM bedeutet: Lowest Isopleth for Mould = unterste Wachstumsgrenze

Die Substratgruppe in der Kirche Breitfurt ist die Gruppe II mit *Baustoffen mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer*. Zur Keimung und Wachstum von Schimmel reicht bei anderen Substratgruppen geringere Luftfeuchte aus.

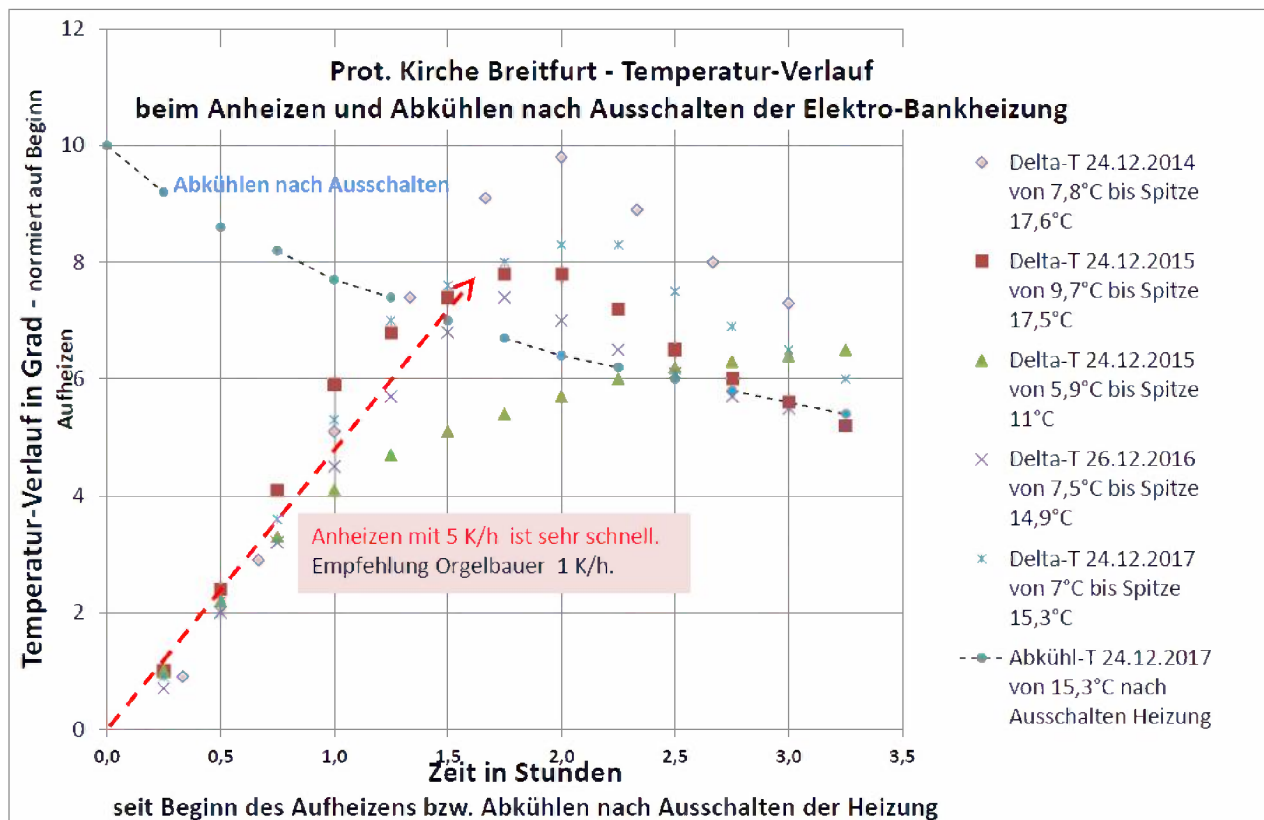
Die untersten Grenzen der Substratgruppe II liegen demnach:

Temperatur °C	Relative Luftfeuchte %, oberhalb derer Keimung und Wachstum auftritt
1	100
5	90
10	85
15	82
20	80
25	79

Blockade der Orgel in Breitfurt

Die Orgel hatte zu Beginn des Heiligabend-Gottesdienstes 2018 einen Dauerton, der das Spielen unmöglich machte. Als Ursache wurde die hohe Aufheiz-Geschwindigkeit der Kirche vermutet. Die installierte Heizung führt zu einer raschen Aufheizung von 5 K/h. Orgelbauer, Organisten und Orgelsachverständige sprechen von einer wünschenswerten Aufheiz-Geschwindigkeit von etwa 1 bis 1,5 Grad pro Stunde (1 K/h) und ebenso sollte das Abkühlen verlaufen.

Messungen der Luftfeuchte und Temperatur im Kirchenraum liegen seit 2014 vor. Um die Messungen zu den Heiligabend-Gottesdiensten vergleichbar zu machen, wurden die Verläufe der Temperatur normiert. Die Änderung der Raumtemperatur beim Anheizen wird auf die Anfangstemperatur vor dem Einschalten der Heizung bezogen, also zum Beispiel auf die Temperatur der kalten Kirche von 7 °C.



Mehrere Vorgänge eines starken Aufheizens sind ohne Folgen für die Spielbarkeit der Orgel gewesen. Allen dargestellten Aufheizvorgängen ist gemeinsam, dass die Aufheiz-Geschwindigkeit 5 K/h und die Spanne der Temperatur-Erhöhung etwa 8 K bis 10 K betrug.

Die Änderung der relativen Feuchte während des Aufheizens war geringfügig, sowohl leicht erhöht als auch leicht abgesenkt um etwa 4 % r.H. Im Rahmen des Messfehlers war die Luftfeuchte mit einem Mittelwert von 83 % r.H. praktisch konstant. Der Taupunkt stieg von im Mittel 5 °C um etwa 8 Kelvin auf ein Mittel von 13 °C.

Umbau der elektrischen Heizung

Die Elektrobankheizungen mit rund 28 kW Leistung wurden vor dem Umbau im Jahr 2020 insgesamt ein- oder ausgeschaltet. Der Umbau hat die Elektrobankheizungen in zwei Gruppen elektrisch getrennt. Damit schalten nun die 8 Leistungs-Schütze in zwei getrennten Gruppen

(Kanäle). Zum Schalten ist die Wochenschaltuhr von Theben TR top3 für zwei Kanäle eingebaut. Sie wird wochenweise programmiert.

Über einen Kanal wird die Kirche mit reduzierter Leistung (etwa 5,5 kW) langsam aufgeheizt und kurz vor Beginn des Gottesdienstes wird über den anderen Kanal auf volle Leistung umgestellt. Dann werden alle Heizkörper in der Kirche warm. Die Aufheizung wird durch einen neuen Raumthermostat auf eine gewünschte Raumtemperatur begrenzt. Dieser Thermostat wird in der Nähe eines Lautsprechers in etwa 2,2 m Höhe montiert. Während des Gottesdienstes wird die Raumtemperatur eingehalten.

Das Zeitprogramm für die Theben Wochenschaltuhr wird bequem am Smartphone erstellt und in der Kirche schnell berührungslos übertragen und aktiviert. Für jede Veranstaltung in der Kirche sind zwei Schaltungen einzurichten. Zum Beispiel für einen Sonntag wird morgens um 2:30 Uhr mit kleiner Leistung (Kanal 1) aufgeheizt und um etwa 9:30 Uhr wird auf volle Leistung bis 11 Uhr (zusätzlich Kanal 2 eingeschaltet) umgestellt.

Beispiel
Auswirkung der Zwei-Kanal-Schaltuhr

