

Methoden des Zentrallabors im BLfD

Teil 4: Langzeiterfassung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Taupunkt – das Klima-Monitoring

Allgemeiner und naturwissenschaftlicher Hintergrund

Schimmel, muffige Luft, abplatzende Farb- und Putzschollen sowie Feuchtigkeitsflecken an der (meist weißen) Wand – jeder kennt sie, die Schadensphänomene, mit denen die meisten von uns mindestens schon einmal im Leben konfrontiert wurden. Das Raumklima ist, vereinfacht dargestellt, das Zusammenwirken von Temperatur, relativer Luftfeuchte und, daraus resultierend, der sogenannte Taupunkt. In der Regel reicht diese simple Betrachtung für die meisten Problemfälle aus, und es besteht keine unmittelbare Notwendigkeit, sich damit weiter zu beschäftigen. In komplizierteren Ausnahmefällen jedoch wäre es von Vorteil, die klimatische Situation als kompliziertes, komplexes und vor allem dynamisches Gebilde aus einer

Vielzahl von einzelnen (materialabhängigen) Faktoren und Parametern zu begreifen.

Die Grafik mit den auf das Raumklima Einfluss nehmenden Faktoren verdeutlicht, weshalb sich eine Vielzahl universitärer und privater Institute mit den Themen Raumklima, Bauphysik oder auch nur mit einzelnen der genannten Parameter beschäftigt. Eine Auseinandersetzung mit den Begrifflichkeiten Temperatur und Luftfeuchte ist aber bedauerlicherweise alternativlos – selbst bei der vereinfachten Betrachtung. Daher kommen wir um die folgenden Erläuterungen nicht herum.

Temperatur

Die Temperatur bezeichnet den messbaren Wärmezustand von Materie bzw. eines Stoffes oder eines Stoffsys-

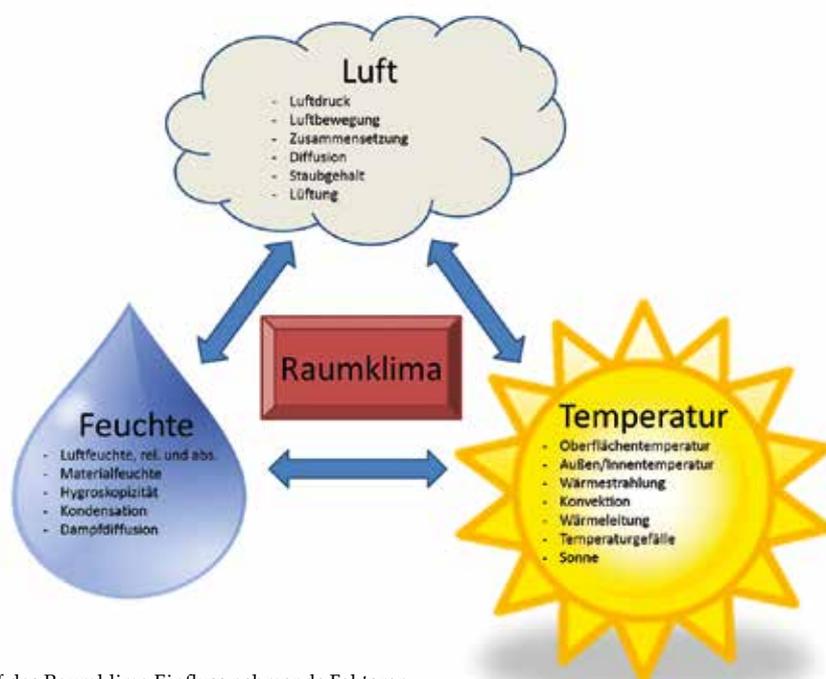
tems. Der Wärmezustand wird durch die mittlere kinetische Energie der ungeordneten Bewegung der Teilchen bestimmt. [Quelle: DWD-Lexikon]

- Physikalische Größe: metrische SI-Einheit K (Kelvin), auch zulässig und gebräuchlich sind °C und °F
- Für Wetter und Klima die wichtigste Kenngröße
- Übt einen wichtigen Einfluss auf den Stoffwechsel von Lebewesen, Teilchenbewegung und Stoffeigenschaften aus
- Unterscheidung zwischen physikalischer und vom Menschen „gefühlter“ Temperatur
- Messung erfolgt u. a. durch thermischen Kontakt (Thermometer) oder anhand der Wärmestrahlung (Thermographie-Kamera).

Luftfeuchte

Als Luftfeuchte (auch: Luftfeuchtigkeit) wird der Anteil des gasförmigen Wassers (Wasserdampf) am Gasgemisch der Erdatmosphäre bezeichnet. Wenn die maximale Menge an Wasserdampf erreicht ist, welche die Atmosphäre aufnehmen kann, dann ist sie mit Wasserdampf gesättigt. Diese maximale Menge hängt von der Temperatur der Luft ab (je höher die Temperatur desto mehr Wasserdampf kann aufgenommen werden).

Die Menge des Wasserdampfes in der Luft kann man entweder direkt in Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft (absolute Feuchte) bzw. in Gramm Wasserdampf pro Kilogramm trockener Luft angeben (Mischungsverhältnis) oder als Relation der vorhandenen zur maximal möglichen Feuchte (relative Feuchte). So hat z. B. dieselbe bei 10 °C völlig gesättigte Luft bei 20 °C eine rela-



Auf das Raumklima Einfluss nehmende Faktoren



Wärmebild einer gefüllten Kaffeetasse

tive Feuchte von nicht einmal 50 % und ist dann also „relativ“ trocken. [Quelle: DWD-Lexikon]

Relative Luftfeuchte:

Dieser Parameter ist definiert als Quotient aus dem in der Luft zum Messzeitpunkt tatsächlich vorherrschenden Dampfdruck und dem lufttemperaturabhängig maximal möglichen Dampfdruck [Sättigungsdampfdruck über Wasser (bzw. über Eis). Quelle: DWD-Lexikon]

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}}$$

Übliche Einheit: % (RH, rF)

Absolute Luftfeuchte f

Maximale Luftfeuchte f_{\max}

Absolute Luftfeuchte:

Bei der absoluten Feuchte handelt es sich ebenfalls um einen Luftfeuchteparameter. Er gibt den Gehalt an Wasserdampf (Gas) in einem definierten Luftvolumen an. Dieser Anteil wird meist in Gramm oder Kilogramm Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft (m^3) ausgedrückt. [Quelle: DWD-Lexikon]

$$f = \frac{m_w}{V}$$

Übliche Einheit: g/m^3

Luftvolumen V

Wasserdampfmasse m_w

Taupunkt

Der Taupunkt oder besser die Taupunkttemperatur gehört zu den Luftfeuchteparametern. Er bezeichnet die Temperatur, auf die ein ungesättigtes Luftquantum bei gleichbleibendem Druck über einer ebenen, chemisch reinen Wasserfläche (Eisfläche beim Reifpunkt) abgekühlt werden muss, um zur Sättigung zu gelangen. Im Sättigungszustand beträgt die relative Luftfeuchtigkeit 100 %. Bei weiterer Abkühlung tritt Kondensation ein – ein Sättigungswert über 100 % ist nicht möglich. [Quelle: DWD-Lexikon]

Ausgehend von der relativen Luftfeuchte (φ in %) und der Temperatur (t in °C) lässt sich der Taupunkt auf Grundlage der „Magnus-Formel“ wie folgt berechnen:

$$td(\varphi, t) = \frac{241,2 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{\varphi_{ges}}\right) + \frac{422,03716 \cdot t}{241,2 + t}}{17,5043 - \ln\left(\frac{\varphi}{\varphi_{ges}}\right) - \frac{17,5043 \cdot t}{241,2 + t}}$$

td = Taupunkt

φ = relative Luftfeuchte

t = Temperatur

φ_{ges} = relative Luftfeuchte im Sättigungszustand

Klimadatenlogger im Zentrallabor des BLfD

Im Gegensatz zu den bekannten Wetterstationen, die lediglich die aktuellen

Werte für Temperatur und Luftfeuchte anzeigen, sowie bei teuren „Designermodellen“, die zusätzlich sogar noch mit Wolken- und Sonnensymbolen das Wetter der kommenden drei Tage „orakeln“, wird für eine Bewertung der raumklimatischen Situation eine Messeinrichtung benötigt, die Werte über einen längeren Zeitraum (im Idealfall 1 Jahr) aufzeichnet. Die heutige Praxis erwartet digitale Datenlogger (natürlich mit USB-Schnittstelle), die eine einfache Bedienung und ein insgesamt gutes Preis/Leistungsverhältnis bieten. Eine bedienerfreundliche Software für eine ansprechende graphische Aufbereitung der Daten ist ebenfalls wünschenswert, da das Auge ja bekannterweise mit(m) ist.

Das Zentrallabor des BLfD setzt für seine Klimamessungen, je nach Anforderung, zwei verschiedene Datenlogger unterschiedlicher Art und Hersteller ein.

Typ A: „EL-USB-2“: für den allgemeinen Einsatz. Dieser kleine, leichte und verhältnismäßig günstige Datenlogger kann als der Standardlogger des Zentrallabors bezeichnet werden. Er lässt sich direkt am Laptop (bei installierter Software) vor Ort programmieren, auslesen und ggf. neu programmieren. Der Datenlogger ist batteriebetrieben und besitzt eine Messdauer (je nach Messintervall) von bis zu mehreren Jahren und hat sich im täglichen Umgang glücklicherweise als robust und relativ unzerstörbar erwiesen.

Typ B: „MIG 06 W (wasserfest)“ für komplexere Anwendungen.

Einrichten des Klimadaten-Monitorings

Die grundsätzliche Frage, die bei einem Klima-Monitoring zu stellen ist, lautet: Was möchte man überhaupt wissen und zu welchem Zweck? Die Antwort auf diese Frage legt die Art, die Anzahl, den Ort, das Messintervall und die Messdauer der Datenlogger fest und wird im Folgenden beispielhaft erläutert:

Beispiel A – Der einsame Altar: In diesem Fall ist meist eine kurzzeitige Erfassung der klimatischen Situation im direkten Nahbereich (oder auch nur auf der Oberfläche) des Altars gewünscht. Je nach Größe des Objekts ist der Einsatz



Datenlogger EL-USB-2 mit Größenangabe
(Foto: BLFD, Martin Mach)

von einem, unter Umständen auch eines zweiten Datenloggers ausreichend. Abhängig vom Schadensbild und -ausmaß ist die Verwendung von Oberflächensensoren für die Fragestellung zielführend. Die Messdauer beträgt, je nach Messintervall, wenige Wochen bis zu einem Jahr.

Beispiel B – Der versalzte Chor: Werden im Zuge der Untersuchung einer Innenmauer, z. B. eines Chores, erhöhte Mauerfeuchten und Salzausblühungen gefunden, so kann ein Klima-Monitoring unterstützend in das Instandsetzungs- oder Restaurierungskonzept eingebunden werden. Mauerwerkschädigende Salze und Mauerwerksfeuchte stehen immer in einem direkten Zusammenhang – meist einem klimatischen. Durch die Erfassung des Ist-Zustands, der für das vorliegende Schadensbild verantwortlich ist, besteht die theoretische Möglichkeit, die Grundbedingungen durch eine gezielte Beeinflussung des Raumklimas (Klimasteuerung) zu verbessern. Ist es technisch möglich und erwünscht, so kann ein definierter „Klimakorridor“ geschaffen werden, der gezielte Salzminderungsmaßnahmen begünstigt oder Phasenübergänge der

detektierten Salze unterbindet. In diesem Fallbeispiel sollten, je nach Befund der naturwissenschaftlichen Voruntersuchung, zwei bis drei Datenlogger mit 1/h-Messintervall für die Dauer (mind.) eines Jahres aufgestellt werden.

Beispiel C – Die wärmende Sitzbank: Der moderne Mensch zeigt – im Gegensatz zu früher – ein steigendes Bedürfnis nach einem wohligen warmen Raum. Galten 18 °C noch vor wenigen Jahrzehnten als angenehme Raumtemperatur, liegt dieser Wert heute bei 20 °C oder 21 °C. Durch dieses gesteigerte Wärmebedürfnis werden immer mehr Kirchen und Gebäude mit effizienteren Heizungsanlagen ausgestattet – nicht ohne Folgen für das Innenraumklima. Der aufmerksame Leser wird sich erinnern, dass eine technische Veränderung der Temperatur (hier aktives Heizen) nicht ohne Auswirkungen auf die Parameter Luftfeuchte und Taupunkt bleiben wird. Der Wert der (relativen) Luftfeuchte kann durch konstante Temperaturerhöhung so erniedrigt werden, dass er für Kunstobjekte aus Holz, Papier, Stoff und Stein schädigend ist. Um den Einfluss einer Bankheizung zu erfassen, ist eine Vielzahl an Datenloggern notwendig. Die Datenlogger sollten sowohl im Nahbereich der wärmenden Sitzbank als auch im Nahbereich unter Umständen gefährdeter Kunstobjekte platziert werden. Eine Verteilung im gesamten Kirchenschiff (auch in unterschiedlichen Höhenniveaus) ist anzuraten. Da Bankheizungen meist auch nur im Vorfeld

von Messen, Konzerten und ähnlichen Veranstaltungen aktiviert werden, und dies auch meist nur im Winterhalbjahr, sollten die Datenlogger in kurzen Intervallen (mind. alle 30 Minuten) aufzeichnen.

Beispiel D – Die Kirche aus bauphysikalischer Sicht: Besteht die Notwendigkeit, eine Kirche in ihrer Gesamtheit bauphysikalisch zu untersuchen oder zu bewerten (z. B. bei grundlegenden Maßnahmen wie neuen Fenstern, Türen, Dachstuhl oder anderen baulichen Veränderungen), ist der Einsatz einer angemessenen Anzahl an Datenloggern anzuraten. Die Datenlogger sollten möglichst viele (alle) architektonische Gliederungen und Einheiten des Baukörpers in unterschiedlichen Höhenlagen erfassen. In diesem Fall sollte zudem ein Datenlogger das Außenklima im Nahbereich der Kirche aufnehmen. Aus dem Vergleich der „Innenlogger“ und des „Außenloggers“ kann abgeschätzt werden, wann und wie der Baukörper auf klimatische Einflüsse von außen reagiert. Als Messintervall ist die stündliche Aufzeichnung ausreichend. Die Messdauer liegt bei mindestens einem Jahr.

Klima-Monitoring am Beispiel der ev. Filialkirche St. Kunigund in Neudettelsau-Reuth

Im Nachgang zu einer naturwissenschaftlichen Untersuchung der Mauerfeuchte und Salzbelastung wurden



Datenlogger MIG 06 W im praktischen Einsatz (Foto: Dombauhütte Köln, Sophie Hoepner)

durch das Zentrallabor des BLfD insgesamt drei Datenlogger in der Kirche angebracht.

Datenlogger 1: Altar Rückseite

Datenlogger 2: Empore West

Datenlogger 3: Turm Außen

Messzeitraum: 1. Sept. 2013 – 31. Juli 2014

Messintervall: 1/h

Fragestellung: Zusammenhang von Raumklima und Salzkristallisation

Vorgefundene Salze mit Ausgleichsfeuchten (bei 20 °C): Kaliumnitrat (94 %), Natriumnitrat (75 %)

Je nach Anzahl der Datenlogger und Art der Fragestellung stehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten bei der Auswertung von aufgezeichneten Klimadaten zur Verfügung. Grundsätzlich werden von jedem Datenlogger folgende Parameter aufgezeichnet:

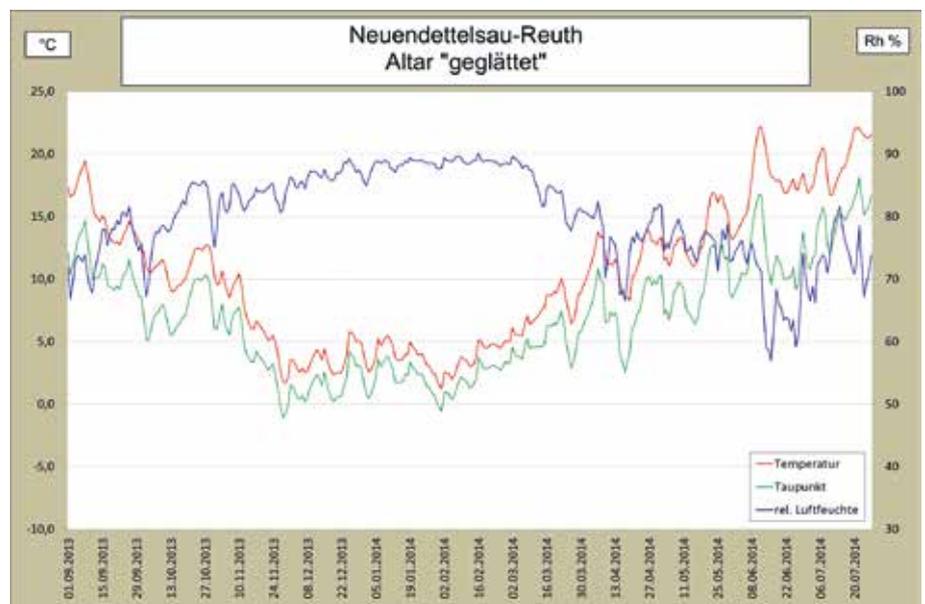
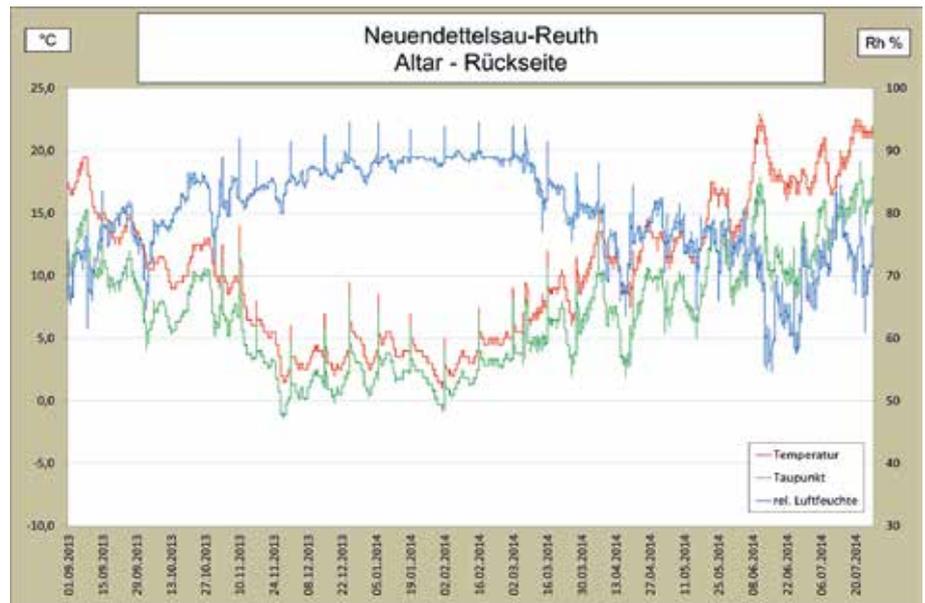
- Nummer der Messung
- Datum
- Uhrzeit
- Temperatur
- Rel. Luftfeuchte
- Taupunkt

Eine tabellarische Auswertung ist dann sinnvoll und ausreichend, wenn lediglich ein Höchst-, Tiefst- und Mittelwert der gesuchten Parameter benötigt werden. Hier ist diese Form der Auswertung nicht zielführend und sei daher nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Grafische Auswertung der Daten:

Bei der grafischen Auswertung eines einzelnen Datenloggers (Standardfall) erhält man den Verlauf der einzelnen Parameter über den gemessenen Zeitraum als Liniendiagramm auf zwei Achsen. Unter Umständen wirken sich vereinzelte Faktoren kurzzeitig störend auf die Messungen aus. Um den Einfluss dieser Störungen abzumildern, ist es hilfreich, aus den Messwerten eines Tages einen Mittelwert zu kreieren, den Verlauf sozusagen zu glätten oder zu bereinigen. Die Kurven der einzelnen Parameter, unabhängig ob geglättet oder nicht, zeigen den Verlauf während eines Jahres in unmittelbarer Nähe des Altars.

Um das für die Fragestellung benötigte Raumklima und somit den



St. Kunigund, Neuendettelsau-Reuth. Grafische Auswertung eines einzelnen Datenloggers, Werteverlauf nach elfmonatiger Aufzeichnung sowie geglätteter Werteverlauf

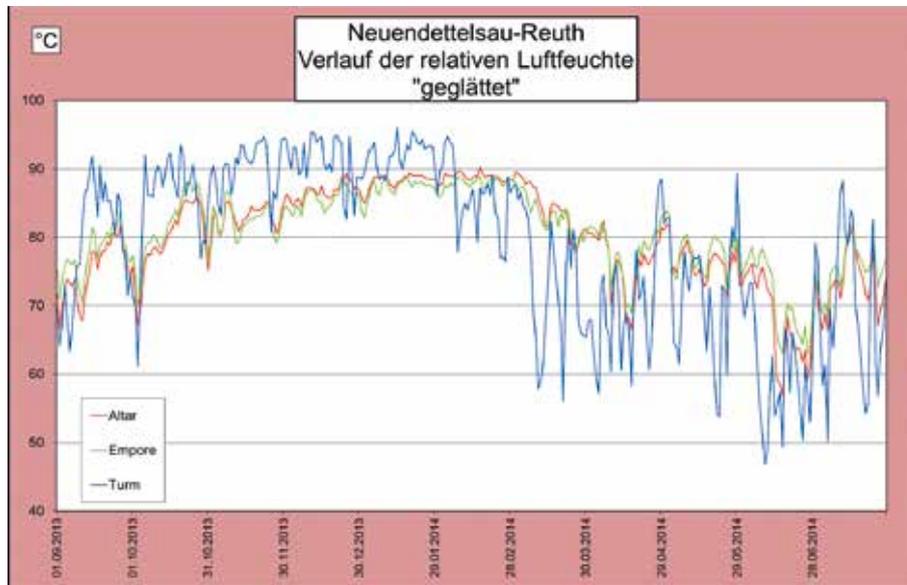
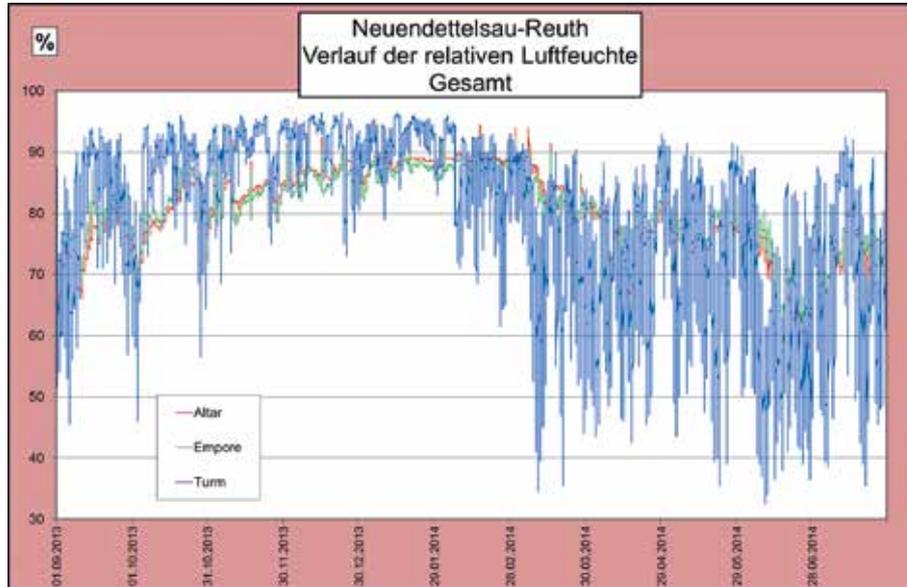
Ist-Zustand zu erfassen, wurden allerdings noch zwei weitere Datenlogger installiert. Stehen bei der Auswertung mindestens zwei oder noch mehr Datenlogger zur Verfügung, so ist es sinnvoll, die einzelnen gemessenen Parameter der Logger zueinander auszuwerten. Diese Variante der Auswertung bietet die Möglichkeit verschiedene räumliche Bereiche zu erfassen und zu vergleichen.

Nachfolgend wird anhand des Parameters „relative Luftfeuchte“ ein Vergleich der Datenlogger visualisiert. Ist, wie in diesem Fall, ein Datenlogger

aus dem Außenbereich mit im Messprogramm, so verdeckt dieser, bedingt durch die extremen Schwankungen (Tag/Nacht und Sommer/Winter) meist die Kurven der „inneren“ Datenlogger. Liegt so ein „störender“ (aber dennoch wichtiger) Datenlogger vor, kann man auf zwei Wege Abhilfe schaffen:

Weg 1: Man entfernt diesen Logger aus dem Excel-Datenblatt – klingt einfach, ist aber gänzlich sinnfrei. Die Frage die dann bleibt ist: „Warum habe ich ihn dann überhaupt aufgestellt?“

Weg 2: Man erstellt von jeder Kurve eine geglättete Kurve aus Mittelwerten.



St. Kunigund, Neuendettelsau-Reuth. Vergleich der relativen Luftfeuchte aller drei Datenlogger (oben) sowie geglätteter Werteverlauf

Der Vorteil liegt neben dem Eliminieren der störenden Faktoren, im Bereinigen der extremen Höchst- und Tiefstwerte. Das Ergebnis ist dann ein übersichtlicher jahreszeitlicher Trend der klimatischen Situation, frei von einzelnen kurzzeitigen Störfeuern.

Betrachtet man alle Diagramme und setzt die Kurven in Relation zur qualitativen Salzanalytik, so lässt sich erkennen, dass beim gemessenen Ist-Zustand keine Phasenübergänge beim Kaliumnitrat zu erwarten sind – dieses liegt konstant in kristalliner Form vor. Allerdings ist die Situation beim Natriumnitrat leider nicht so günstig. Natriumnitrat besitzt bei einer Temperatur von 20°C eine Ausgleichsfeuchte von 75,2 %. Verfolgt man nun den jahreszeitlichen Verlauf der relativen Luftfeuchte in den letzten beiden Diagrammen, so lassen sich bei den Datenloggern „Altar“ und „Empore“ während des Sommerhalbjahres (ca. April bis Oktober) Werte ablesen, die Phasenübergänge (Lösung und Rekristallisation) bei Natriumnitrat verursachen.

In Abhängigkeit von den klimatischen Anforderungen der hölzernen Ausstattung wird aktuell ein Konzept erarbeitet, das versucht, möglichst allen Bedürfnissen gerecht zu werden. Derzeit werden punktuell kleinere Maßnahmen durchgeführt und deren Auswirkungen auf die raumklimatische Situation mittels eines Langzeitmonitorings (bis fünf Jahre) erfasst.