Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken III

Klimamonitoring – Einführung und Erstellung einer Leistungsbeschreibung

Merkblatt E-10-4

Ausgabe: 10.2026/D
Einspruchsfrist: 30.04.2027

Climate and climate stability in historic buildings III

Environmental monitoring – Introduction and preparation of specifications

Climat et stabilité climatique dans les bâtiments historiques III

Suivi climatique – Introduction et élaboration d'un cahier des charges

Deskriptoren

Klimamonitoring, historische Bauwerke, präventive Konservierung, Messkonzept, Datenqualität, Leistungsbeschreibung

Key Words

Environmental monitoring, historic buildings, preventive conservation, monitoring design, data quality, specifications

Mots-clés

Suivi climatique, bâtiments historiques, conservation préventive, dispositif de mesure, qualité des données, cahier des charges

Erläuterungen zum Merkblatt

Dieses Merkblatt unterstützt die fachgerechte Ausschreibung eines Klimamonitorings. Die ergänzenden WTA-Merkblätter werden nach ihrem Bezug zur jeweiligen Aufgabe ausgewählt.

Unmittelbare Grundlagen sind WTA 6-12-11/D »Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken I« und WTA 10-3-22/D »Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte«. Die nachfolgend genannten Merkblätter sind bei entsprechender Fragestellung in der jeweils aktuellen Fassung heranzuziehen. Daraus ergibt sich keine allgemeine Pflicht zu zusätzlichen Luftdichtheitsmessungen, Thermografie oder Simulation. Maßgebend ist die im Auftrag bezeichnete Aufgabe.

4-11	Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte bei mineralischen Baustoffen
4-12	Ziele und Kontrolle von Schimmelpilzschadensanierungen in Innenräumen
6-3	Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos
6-8	Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation
E-7-3	Mauerwerkseigenschaften – Untersuchen und Bewerten
10-2	Präventive Konservierung architekturgebundener Glasmalerei
E-10-5	Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken IV: Gebäudetechnik

Inhalt

		Seite
1	Zielgruppe und Anwendungsbereich	4
2	Begriffsbestimmung	4
3	Einleitung	5
4	Messtechnische Klimabereiche	7
5	Aufgaben- bzw. Fragestellung/Zielsetzung	8
6	Konzeption des Monitorings	9
7	Leistungsbeschreibung	19
8	Orientierende Bewertungsgrundlagen	21
9	Literatur	25
A	Anhang A – Beispiele zur Dokumentation der Messpositionen	27
B	Anhang B – Beispiele zur Klimadatenauswertung	30

Freiexemplar

ENTWURF

© Copyright by Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.
Vertrieb: WTA Publications, Tel. +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Fraunhofer IRB | Verlag

Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken III

Deutsche Fassung vom Oktober 2026

Referat 10 – Präventive Konservierung

Leiter des Referates

Ralf Kilian

Leiter der Arbeitsgruppe

Simone Reeb

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Stefan Bichlmair
Harald Garrecht
Ulrike Henes-Klaiber
Theresa Hilger
Kristina Holl
Dörthe Jakobs
Dunja Kielmann
Ralf Kilian
Thomas Löther
Dennis Mitschke
Tina Naumovic
Horst Schuh
Andreas Schulze

Erarbeitung des Merkblattes

Beginn der Arbeiten:	Mai 2016
Ende der Arbeiten:	September 2026
Merkblattentwurf:	Oktober 2026
Endgültige Fassung:	–

ISBN (E-Book) 978-3-7388-1126-1

Freiexemplar

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung geschlechterspezifischer Sprachformen verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

WTA-Merkblätter

Herausgeber

WTA International e.V., Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.

Schriftleitung

Clemens Hecht, Tobias Steiner

Vertrieb

WTA Publications
Telefon +49-89-57 86 97 27, Fax +49-89-57 86 97 29, email: info@wta-international.org

Die WTA ist stets bemüht in ihren Merkblättern den jeweiligen aktuellen Stand des Wissens festzuhalten. Wenn Sie vor Ablauf der Einspruchsfrist Verbesserungen, Änderungen vorschlagen möchten, wenden Sie sich bitte direkt an den Leiter der Arbeitsgruppe.

© Alle Rechte bei der WTA International e.V.. Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet.

Die Angaben in diesem Merkblatt stützen sich auf den derzeitigen Stand unserer Kenntnisse. Die WTA International e. V. kann jedoch keinerlei Haftung übernehmen. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an die Geschäftsstelle der WTA International e.V. zu richten.

Bei Streitfällen ist die deutsche Fassung gültig.

Den auftragvergebenden Architekten, Denkmalpflegeämtern und den staatlichen, kommunalen und kirchlichen Bauämtern wird nahegelegt, auf dieses und die weiteren Merkblätter der WTA zum Bautenschutz und zur Bauwerksinstandsetzung in Ausschreibungen und Aufträgen Bezug zu nehmen und deren Kenntnisnahme allen Auftragnehmern zur Auflage zu machen.

Fraunhofer IRB Verlag, 2026
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon +49 7 11 970-25 00, Telefax +49 7 11 970-25 99, E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de, http://www.baufachinformation.de

Kurzfassung

Das Merkblatt führt in das Klimamonitoring historischer Bauwerke und ihrer baugebundenen sowie mobilen Ausstattung ein. Es richtet sich an Bauherren, Nutzer, Denkmalpfleger, Restauratoren, Architekten und Fachplaner und unterstützt die Erstellung eindeutiger Leistungsbeschreibungen. Ausgangspunkt ist eine objektspezifische Fragestellung. Daraus werden Messgrößen, Messpositionen, Messdauer, zeitliche Auflösung und Anforderungen an das Messsystem abgeleitet. Erläutert werden die messtechnischen Klimabereiche sowie Anforderungen an Installation, Messqualität, Dokumentation, Datensicherung und Auswertung. Beispiele veranschaulichen die Untersuchung von Kondensationspotenzial, Schimmelpilzwachstumspotenzial, Salzphasenwechseln und kurzfristigen Klimaschwankungen. Messbefunde, rechnerische Potenziale und nachgewiesene Schäden sind zu unterscheiden; Unsicherheiten und Aussagegrenzen sind zu berücksichtigen. Das Merkblatt umfasst befristete Messkampagnen und dauerhafte Überwachung. Weiterführende Empfehlungen und Maßnahmen sind entsprechend dem vereinbarten Leistungsumfang zu bearbeiten. Allgemeingültige Klimagrenzwerte werden nicht festgelegt.

Deskriptoren: Klimamonitoring, historische Bauwerke, präventive Konservierung, Messkonzept, Datenqualität, Leistungsbeschreibung

Abstract

This technical guideline introduces environmental monitoring in historic buildings and their fixed and movable contents. It is intended for building owners, users, heritage professionals, conservator-restorers, architects and specialist consultants, and supports the preparation of clear specifications. Monitoring starts with a question specific to the building and its contents. This question determines the variables, measurement locations, monitoring period, temporal resolution and system requirements. The guideline explains the spatial scales of the monitored environment and addresses installation, measurement quality, documentation, data preservation and analysis. Examples illustrate the assessment of condensation potential, mould growth potential, salt phase transitions and short-term climatic fluctuations. Measured findings, calculated potentials and observed damage must be distinguished, taking account of uncertainties and limitations. The guideline covers both time-limited campaigns and continuous monitoring. Further recommendations and measures depend on the agreed scope of work. It does not establish universally applicable climatic limits.

Key Words: Environmental monitoring, historic buildings, preventive conservation, monitoring design, data quality, specifications

Résumé

Cette fiche technique présente le suivi climatique des bâtiments historiques et de leur patrimoine mobilier et immobilier. Elle s'adresse aux maîtres d'ouvrage, utilisateurs, professionnels du patrimoine, conservateurs-restaurateurs, architectes et bureaux d'études, et facilite la rédaction de cahiers des charges précis. Le suivi part d'une question propre au bâtiment et aux biens concernés. Celle-ci détermine les grandeurs à mesurer, les emplacements, la durée du suivi, la résolution temporelle et les exigences du système de mesure. La fiche expose les différentes échelles spatiales du climat étudié et traite de l'installation, de la qualité des mesures, de la documentation, de la conservation des données et de leur analyse. Des exemples illustrent l'évaluation du potentiel de condensation, du développement potentiel de moisissures, des transitions de phase des sels et des fluctuations climatiques à court terme. Il convient de distinguer mesures, potentiels calculés et dommages constatés, en tenant compte des incertitudes et des limites d'interprétation. La fiche couvre les campagnes limitées dans le temps et le suivi permanent. Les recommandations et mesures complémentaires dépendent des prestations convenues. Elle ne fixe pas de limites climatiques universelles.

Mots-clés: Suivi climatique, bâtiments historiques, conservation préventive, dispositif de mesure, qualité des données, cahier des charges

Freiexemplar

1 Zielgruppe und Anwendungsbereich

Zum Schutz des kulturellen Erbes sind Gefährdungen und mögliche Schäden an Gebäuden sowie an ihrer baugebundenen und mobilen Ausstattung frühzeitig zu erkennen und möglichst zu vermeiden. Hierzu können restauratorisches Monitoring und Klimamonitoring beitragen. Das vorliegende Merkblatt ist Teil der Merkblattreihe »Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken«. Grundlagen enthalten die Merkblätter »Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken I« [1], »Präventive Konservierung architekturgebundener Glasmalerei« [2] und »Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte« [3]. Weiterführende Aspekte zum Thema Klima in historischen Gebäuden werden in weiteren Merkblättern dieser Reihe vertieft.

Das Merkblatt umfasst sowohl zeitlich begrenzte Messkampagnen zur Klärung einzelner Fragestellungen als auch eine dauerhafte Klimaüberwachung. Automatisierte Regelung, Planung konservatorischer Maßnahmen und hygrothermische Simulation sind ergänzende Leistungen. Ihr Umfang, ihre Schnittstellen und ihre Verantwortlichkeiten sind bei Bedarf gesondert zu vereinbaren.

Das Merkblatt richtet sich an Bauherren, Nutzer, Denkmalpfleger, Restauratoren, Architekten und Fachplaner. Ziel ist es, in das Thema Klimamonitoring einzuführen und die Erstellung von Leistungsbeschreibungen zu erleichtern.

2 Begriffsbestimmung

Ansprechzeit (Einstellzeit) [4]

Zeit zwischen einer sprunghaften Änderung der Messgröße und dem Erreichen eines festgelegten Anteils der Anzeigeänderung. Bezugsbedingungen und Anteil sind anzugeben. Bei näherungsweise exponentiellem Verhalten entspricht die Zeit bis 63,2 % der Änderung der Zeitkonstante; 90 % werden nach etwa dem 2,3-Fachen der Zeitkonstante erreicht.

Auflösung [5], [4]

Kleinste sinnvoll unterscheidbare Differenz zwischen den Anzeigen eines Anzeigegeräts.

Ausstattungen/Einbauten

Alle beweglichen und baugebundenen Objekt- und Materialgruppen, die der Gestaltung von Innenräumen dienen, wie z. B. Holzvertäfelungen, Mobiliar, Gemälde, Textilien, Tapeten, Gläser, Metalle.

Autonomer Messknoten

Gerät, das Messdaten lokal aufzeichnet und für die Messwerterfassung keine Vernetzung mit weiteren Messstellen benötigt.

Grenzwerte und Schwellenwerte

Grenzwerte begrenzen einen fachlich festgelegten zulässigen Bereich; Schwellenwerte können bereits vor dessen Verlassen eine Meldung auslösen. Für ein Meldesystem sind neben den Werten auch die zulässige Dauer und Häufigkeit von Abweichungen, die Zuständigkeiten und die vorgesehenen Reaktionen festzulegen. Messunsicherheit und zeitliche Auflösung sind dabei zu berücksichtigen.

Historisches Klima [6]

Klimatische Bedingungen in der Mikroumgebung eines Kulturguts während eines repräsentativen zurückliegenden Zeitraums, in der Regel mindestens eines Jahres. Die Kenntnis des historischen Klimas unterstützt die Bewertung; sie belegt für sich allein jedoch nicht, dass diese Bedingungen für das Objekt unbedenklich waren.

Hygroskopisches Material [6]

Material, das Feuchtigkeit adsorbiert, wenn die relative Luftfeuchte in der Umgebung ansteigt, und das Feuchtigkeit abgibt, wenn die relative Luftfeuchte absinkt.

Klimakorridor [6], [3]

Ein Klimakorridor beschreibt einen objektspezifisch festgelegten zulässigen Bereich klimatischer Größen, insbesondere von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Er kann von der Jahreszeit oder von weiteren Messgrößen abhängen. Seine Festlegung berücksichtigt Materialempfindlichkeit, historischen Klimaverlauf, vorhandene Schäden und Nutzung. Zulässige Änderungsgeschwindigkeiten sind zusätzlich festzulegen, sofern sie für die Aufgabe relevant sind.

Freiexemplar

Messbereich

Messbereich bezeichnet den Wertebereich eines Messgeräts.

Messintervall

Das Messintervall ist die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen. Die Abtastrate (Samplingrate) ist die Anzahl der Messungen je Zeiteinheit und damit der Kehrwert des Messintervalls. Im Folgenden werden Zeitangaben in Minuten oder Stunden als Messintervalle bezeichnet. Messintervall, Speicherintervall und Übertragungsintervall sind voneinander zu unterscheiden.

Messnetzdichte

Die Messnetzdichte beschreibt die Anzahl und räumliche Verteilung der Messstellen im Verhältnis zur untersuchten Fläche oder zum untersuchten Volumen. Entscheidend ist, ob die für die Fragestellung relevanten Bereiche erfasst werden.

Messunsicherheit [4]

Messunsicherheit beschreibt die Streuung der Werte, die einer Messgröße aufgrund der verfügbaren Informationen zugeordnet werden können; sie wird durch einen nicht negativen Parameter ausgedrückt (sinngemäß nach VIM, Begriff 2.26). Messabweichung bezeichnet die Differenz zu einem Referenzwert. Eine zulässige Abweichung ist eine festgelegte Anforderung, die Auflösung die kleinste unterscheidbare Anzeigeänderung. Für die aufgabenspezifische Unsicherheitsbetrachtung sind unter anderem Kalibrierung, Drift, Auflösung und Einbaueinflüsse zu berücksichtigen. Bei abgeleiteten Größen, etwa Taupunkttemperatur, sind die Unsicherheiten der Eingangsgrößen und gegebenenfalls deren Korrelation fortzupflanzen.

Mikroklima [6]

Klima in einem Gebäudeteil oder Raum, welches vom Klima in der Umgebung abweicht. Es ist ein im kleinen räumlichen Maßstab betrachtetes Klima und bezieht sich gewöhnlich auf die Mikroumgebung, die in Wechselwirkung mit den betreffenden Objekten steht.

Nahfeldklima

Klima in unmittelbarer Nähe der zu untersuchenden Oberfläche, mindestens beschrieben durch Lufttemperatur und relative Luftfeuchte. Sensorabstand und Einbausituation sind zu dokumentieren. Für die Bewertung oberflächenbezogener Risiken ist zusätzlich die zugehörige Oberflächentemperatur einzubeziehen.

Sensor [4]

Gerät, das entweder den absoluten Wert oder eine Änderung einer physikalischen Größe feststellt und diese(n) in ein nutzbares Eingangssignal für ein Datenerfassungssystem umwandelt.

Sonde [5]

Kleines Gerät, das in oder auf dem Gegenstand angeordnet wird, um Messungen durchzuführen oder den Sensor zu schützen. Üblicherweise so ausgelegt, dass das Ergebnis nicht signifikant beeinflusst wird.

Stabilität [4]

Fähigkeit eines Messgeräts, seine messtechnischen Eigenschaften über einen bestimmten Zeitraum beizubehalten. Veränderungen sind bezogen auf Messgröße, Zeitraum und Einsatzbedingungen anzugeben.

Taupunkttemperatur (Taupunkt) [7]

Temperatur, auf die Luft bei konstantem Druck und konstantem Wasserdampfgehalt abgekühlt werden muss, um Sättigung zu erreichen.

3 Einleitung

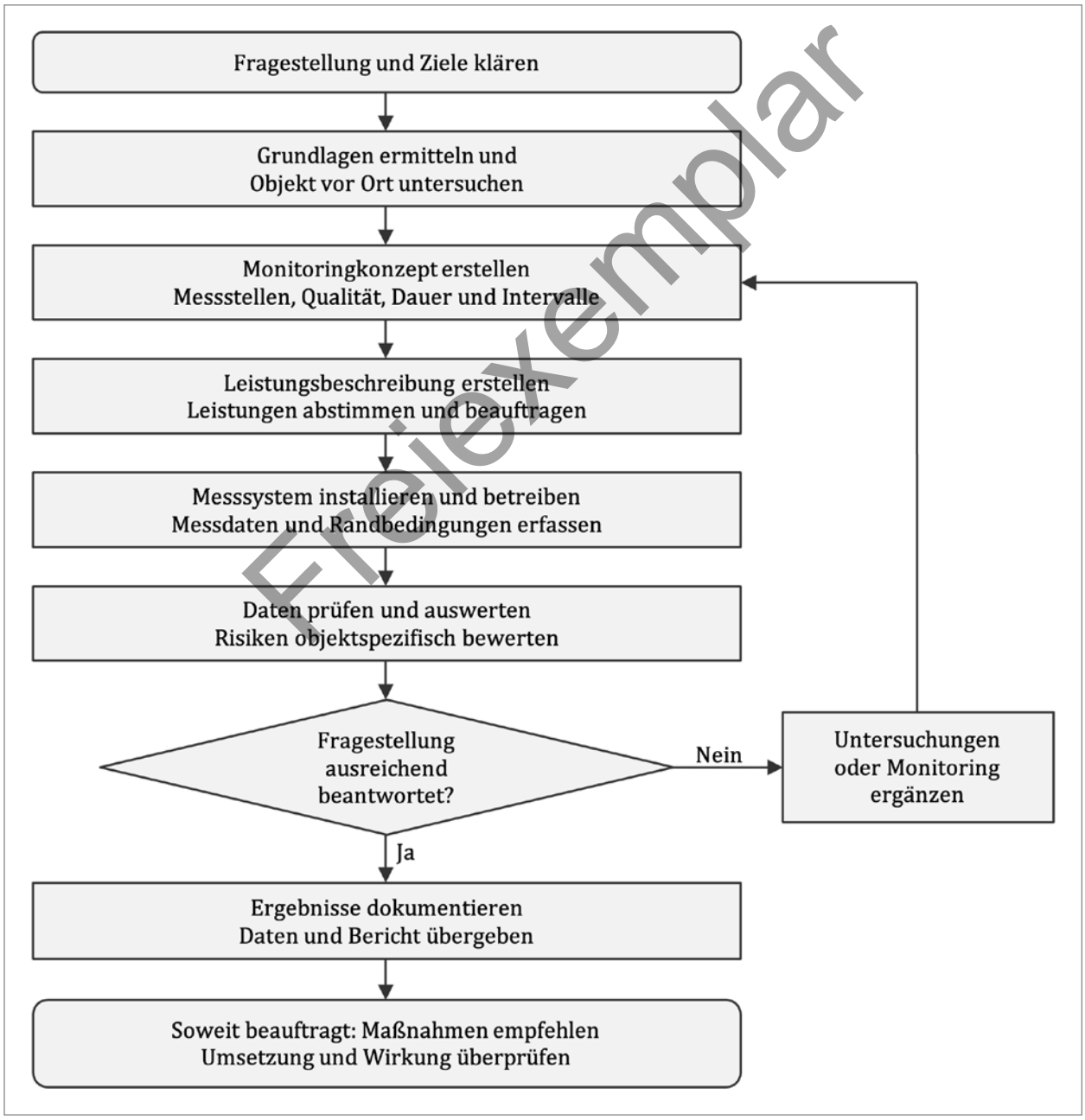
Klimamonitoring umfasst die Erfassung, Dokumentation und Auswertung klimatischer Größen zur Beantwortung einer definierten Fragestellung. Es kann als befristete diagnostische Untersuchung oder als dauerhafte Überwachung durchgeführt werden. Die Daten unterstützen die Bewertung von Risiken und gegebenenfalls Entscheidungen über Maßnahmen. Ein Eingriff in den Anlagenbetrieb oder eine automatisierte Regelung ist damit nicht automatisch beauftragt.

Freiexemplar

Klimatische Einflussgrößen wirken auf die Oberflächen der Raumschale und auf die historische Ausstattung ein. Gibt es Hinweise darauf, dass das aktuelle Klima sich schädigend auswirkt, sind Möglichkeiten zu prüfen, das Raum- und/oder das Nahfeldklima positiv zu verändern. Dieser Prozess (Planung, Prüfung) beginnt mit dem Erfassen des aktuellen Klimas im Rahmen eines Klimamonitorings. Das Klimamonitoring muss sich hinsichtlich Qualität (Messdauer, Umfang etc.) an der jeweiligen Fragestellung orientieren.

Eine Leistungsbeschreibung setzt klar definierte Anforderungen voraus, damit Angebote vergleichbar sind. Sie kann durch fachlich qualifizierte Personen innerhalb der beauftragenden Institution oder als gesonderter Auftrag erstellt werden. Die Grundlagenerfassung [1], [3] und die Erstellung des darauf aufbauenden Monitoringkonzepts sind jeweils als eigenständige Leistungen zu behandeln und entsprechend zu beauftragen. Im Folgenden werden die Schritte von der Grundlagenerfassung und Konzeption über die Leistungsbeschreibung bis zur Durchführung und Bewertung des Klimamonitorings erläutert.

Der vereinfachte Flussplan zeigt den Gesamtprozess (Bild 1). Die ausführlichen Flusspläne gliedern ihn in Planung, Durchführung und Bewertung (Bild 3 bis Bild 5). Rücksprünge kennzeichnen erforderliche Ergänzungen. Die Auswahl der Untersuchungen richtet sich nach dem auszuführenden Auftrag.



Freiexemplar

Bild 1 Vereinfachter Flussplan zum Klimamonitoring

4 Messtechnische Klimabereiche

Sowohl für die Leistungsbeschreibung als auch für die Konzeption eines Klimamonitorings ist die eindeutige Verwendung der Klimabereiche erforderlich (Kapitel 2). Bild 2 zeigt deren räumliche Zuordnung klimatischer Einflussbereiche. Die Bereiche beeinflussen sich gegenseitig; Außenklima, Gebäude, Nutzung und Anlagentechnik wirken dabei zusammen.

Die äußerste Ebene bildet die Witterung. Sie umfasst die klimatischen Bedingungen der Außenumgebung eines Gebäudes, beispielsweise Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Wind und Strahlung. Diese Faktoren wirken auf die Gebäudehülle ein und bilden die primären Randbedingungen für alle weiteren klimatischen Prozesse im Gebäude. Innerhalb des Gebäudes entsteht daraus das Raumklima. Es beschreibt die klimatischen Bedingungen eines gesamten Raumes, insbesondere Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftbewegung. Das Raumklima wird sowohl durch die äußeren Witterungsbedingungen als auch durch bauliche Eigenschaften des Gebäudes, die Nutzung sowie durch technische Anlagen beeinflusst. Eine weitere Ebene bildet das Mikroklima im unmittelbaren Bereich von Ausstattungsgegenständen oder Einbauten. Dazu zählen beispielsweise Altäre, Vitrinen, Möbel, Kunstwerke oder andere empfindliche Objekte. In diesen Bereichen können klimatische Bedingungen auftreten, die sich vom allgemeinen Raumklima unterscheiden, etwa durch eingeschränkte Luftzirkulation, Strahlungseinflüsse oder Materialeigenschaften. Die innerste Ebene stellt das Nahfeldklima dar. Es beschreibt die klimatischen Bedingungen unmittelbar an Bauteiloberflächen oder Objektoberflächen, beispielsweise an Wänden, Gewölben oder Ausstattungsstücken. In diesem Bereich können sich durch Wärme- und Feuchtetransport, Strahlung oder Luftströmungen lokale Unterschiede gegenüber dem Raumklima einstellen. Gerade hier entstehen häufig bauphysikalisch oder konservatorisch relevante Prozesse wie Kondensation, Feuchteanreicherung oder Materialspannungen.

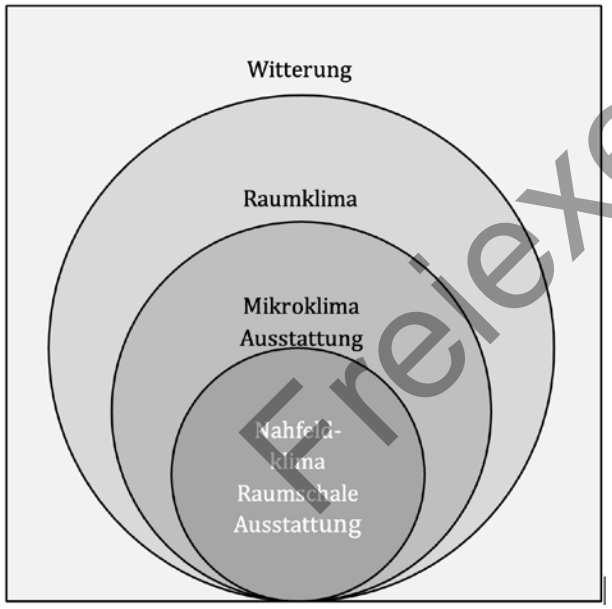


Bild 2 Verortung messtechnischer Klimabereiche;
siehe Tabelle 1

Für die Bewertung von Schadensprozessen und für konservatorische Maßnahmen sind neben dem Raumklima insbesondere das Mikro- und Nahfeldklima von Bedeutung. Tabelle 1 erläutert die Bereiche und die für die jeweilige Fragestellung erforderlichen Messgrößen.

Freiexemplar

Klimabereich	Definition	minimale Messgrößen
Witterung	Meteorologische Größen am Ort des Monitorings	Temperatur; relative Luftfeuchte
Raumklima	Klima in einem Raum oder Gebäude oder in verschiedenen Räumen eines Gebäudes	Temperatur; relative Luftfeuchte
Mikroklima	Klima im kleinen räumlichen Maßstab. Bezieht sich auf die Mikroumgebung, die in Wechselwirkung mit den betreffenden Objekten steht.	Temperatur; relative Luftfeuchte
Nahfeldklima	Luft unmittelbar vor der zu untersuchenden Oberfläche; Sensorabstand dokumentieren	Lufttemperatur; relative Luftfeuchte; zugehörige Oberflächentemperatur bei Oberflächenbewertung

Tabelle 1 Definitionen messtechnischer Klimabereiche sowie Auflistung minimal aufzuzeichnender Messgrößen

5 Aufgaben- bzw. Fragestellung/Zielsetzung

Jedes Klimamonitoring benötigt eine klar formulierte Fragestellung. Bekannte Schäden und vermutete Risiken sind zu benennen; ihre Ursachen müssen zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend geklärt sein. Gegebenenfalls sind restauratorische oder andere Untersuchungen sowie Archivalienforschung voranzustellen. Fragestellung und Voruntersuchungen richten sich nach dem Objekt. Tabelle 2 nennt beispielhafte Themenkreise, die bei der Entwicklung eines Monitoringkonzepts zu prüfen sind.

Freiexemplar

Thema	Datenerfassung/zusätzliche Untersuchungen
Raumklima	In Räumen mit großem Volumen sollte das Raumklima an mehreren Positionen und in mehreren Höhenlagen erfasst werden.
Mikroklima	Das Mikroklima beschreibt klimatische Bedingungen in kleinen Teilbereichen, beispielsweise innerhalb oder hinter Ausstattungsstücken. Es kann vom Raumklima abweichen. Zur Bewertung oberflächenbezogener Risiken sind die Messstellen im Nahfeld der betroffenen Oberfläche anzuordnen und gegebenenfalls durch Oberflächentemperatursensoren zu ergänzen.
Witterungsbedingte Einflüsse	Für die Bewertung von Außenklimaeinflüssen sind Außen- und Innenklima gemeinsam zu erfassen. Ergänzende Angaben zu Öffnungszuständen, Wind und Anlagenbetrieb erleichtern die Interpretation. Aus Temperatur und Luftfeuchte allein lässt sich eine Luftwechselrate in der Regel nicht eindeutig bestimmen.
Nutzungsbedingte Einflüsse	Nutzung, Besucherzahlen, Lüftungsverhalten und Anlagenbetrieb sind mit Zeitbezug zu dokumentieren und gemeinsam mit den Klimadaten auszuwerten.
Solare Einträge	Nahfeldklima und Oberflächentemperatur sind an den relevanten Positionen zu erfassen. Bei entsprechender Fragestellung sind Strahlungsmessungen oder Angaben zu Besonnung und Verschattung zu ergänzen.
Biogener Befall	Für das Schimmelpilzwachstumspotenzial sind Nahfeldklima und gegebenenfalls die Oberflächentemperatur an der gefährdeten Stelle zu erfassen. Eine modellgestützte Bewertung kann nach WTA-Merkblatt 6-3 [10] erfolgen. Tatsächlicher Befall und andere biogene Prozesse sind durch geeignete restauratorische beziehungsweise mikrobiologische Untersuchungen zu klären.
Oberflächenkondensat	Die aus dem Nahfeldklima berechnete Taupunkttemperatur wird mit der zeitgleich gemessenen zugehörigen Oberflächentemperatur verglichen. Raumklimadaten können die lokalen Verhältnisse unzutreffend abbilden und das Kondensationspotenzial sowohl unter- als auch überschätzen.

Tabelle 2 Exemplarische Themenkreise

Thema	Datenerfassung / zusätzliche Untersuchungen
Salzphasenwechsel	Erforderlich sind Nahfeldklima und eine geeignete Salzanalytik der betroffenen Bereiche. Die bloße Zuordnung zu Chloriden, Nitraten oder Sulfaten reicht nicht aus; Salzarten beziehungsweise Salzgemische, Verteilung und relevante Phasengrenzen sind zu berücksichtigen.
Thermisch-hygrische Formänderungen	Klimadaten sind mit geeigneten Verformungsmessungen, beispielsweise Wegmessungen oder digitaler Bildkorrelation, zu verbinden. Materialkennwerte aus vorhandenen Unterlagen oder Laboruntersuchungen können die Bewertung unterstützen. Eine Probenahme ist nur bei fachlicher Notwendigkeit und nach konservatorischer Abstimmung vorzusehen. Feuchtespeicherung allein beschreibt noch keine Formänderung; hierfür sind entsprechende Materialkennwerte erforderlich.
Verschmutzungen	Vor der Auswahl der Messtechnik sind mögliche Quellen und Transportwege der Verschmutzung zu prüfen, beispielsweise Anlagenbetrieb, Kerzen oder Besucher.
Chemische Alterung und Korrosion	Materialien, Reaktionsbedingungen und mögliche Schadstoffquellen objektspezifisch untersuchen. Temperatur und Feuchte zeitbezogen erfassen; bei Bedarf Materialbefunde und geeignete Schadstoffmessungen einbeziehen.
Licht- und Strahlungseinwirkung	Beleuchtungsstärke, Expositionsdauer und gegebenenfalls UV-Bestrahlungsstärke am Objekt erfassen. Materialempfindlichkeit, Besonnung und Beleuchtungsbetrieb dokumentieren.

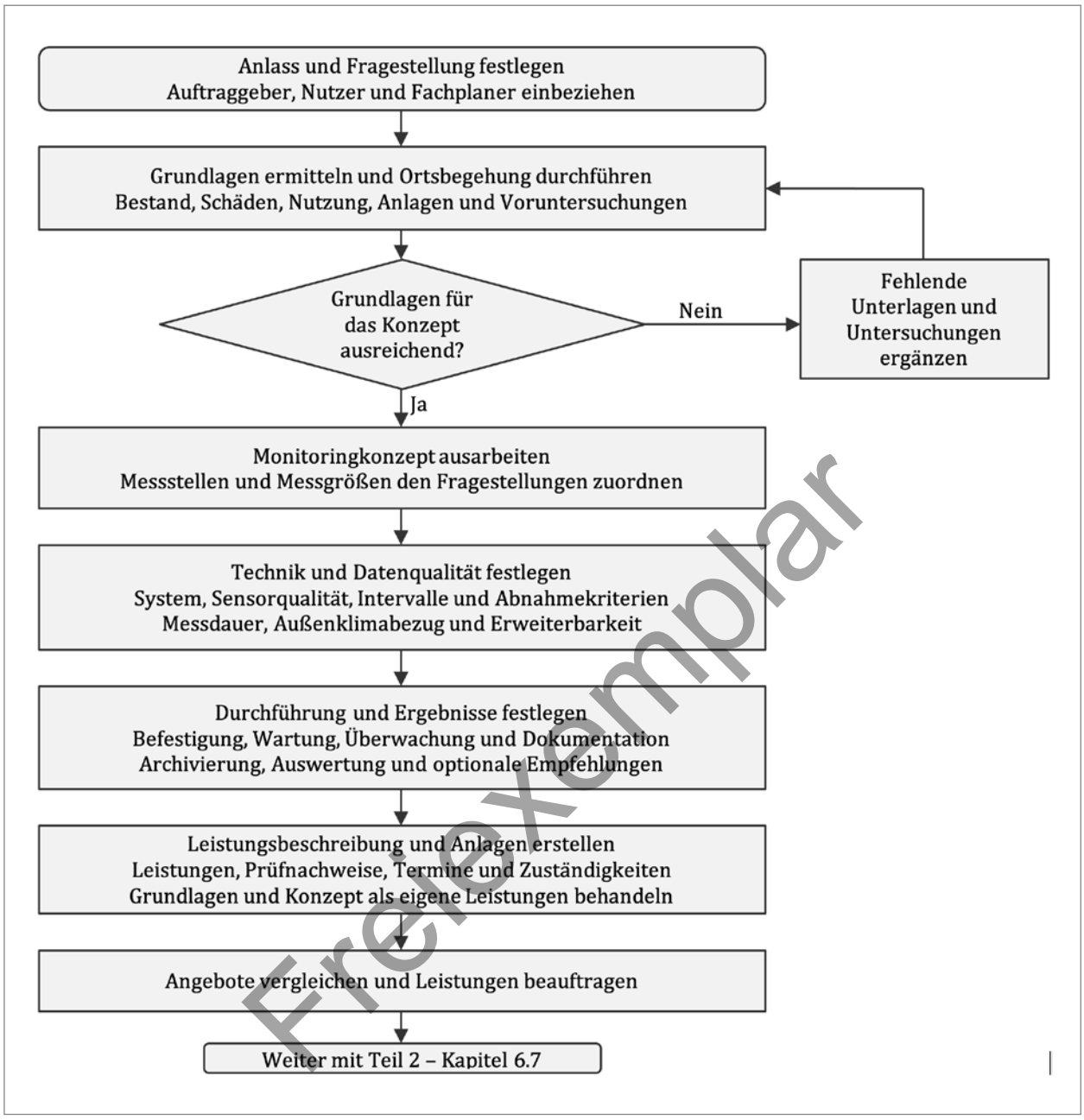
Tabelle 2 Exemplarische Themenkreise

6 Konzeption des Monitorings

Für die Erarbeitung eines Monitoringkonzepts sind die folgenden Punkte zu klären und in der Leistungsbeschreibung zu berücksichtigen. Die Grundlagenerfassung und die Ortsbegehung sind der Konzeptionierung des Monitorings und dem Klimamonitoring selbst voranzustellen (Bild 3). Bei der Grundlagenerfassung sind Fragestellung und die Ziele des Klimamonitorings festzulegen (vgl. Kapitel 5). Weitere Hinweise enthält WTA-Merkblatt 10-3 [3]. Folgende Angaben sind im Rahmen der Erfassung zu prüfen und zu dokumentieren:

- Objektnennung (Ort, Objekt, Daten, Bestand usw.)
- Geografische Lage und Umgebungsbedingungen (z. B. Gewässer, Höhenlage, geografische Ausrichtung, Schlagregenbelastung, bekannte Extremwettereignisse, Böden etc.)
- Allgemeine Beobachtungen zum Bestand und Zustand des Gebäudes (Wasserführung, Drainage, biogener Befall, Salzbelastung, sichtbare Schäden, undichte Fenster und Türen)
- Ausstattung (Schäden, biogener Befall u. a.)
- Konstruktion des Gebäudes (Raumschale); Anordnung der Räume im Gesamtgebäude, Fensteraufbau, Windfang usw.
- Vorhandene Anlagentechnik und deren Nutzung/Einstellungen
- Relevante Restaurierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen und Objektgeschichte (Archivalien, Berichte, historische Fotografien usw.)
- Bisherige Untersuchungen und Ergebnisse
- Mögliche Problemzonen (Feuchte, Putzschäden, Salzausblühungen, biogener Befall, strukturelle oder optische Veränderungen)
- Nutzung des Gebäudes (Besucher, Zugangszeiten, Veranstaltungen usw.)
- Gegebenenfalls noch ausstehende Untersuchungen

Freiexemplar



Freiexemplar

Bild 3 Ausführlicher Flussplan zum Klimamonitoring, Teil 1 von 3 – Planung und Beauftragung

6.1 Mess- bzw. Betriebsdauer des Monitoringsystems

Abhängig von den individuellen Problemstellungen und den damit verbundenen Fragestellungen am Objekt ergeben sich die Anforderungen an die Messdauer.

Für die Beurteilung eines Jahresgangs ist ein vollständiger Jahreszyklus zu erfassen. Das vorliegende Merkblatt empfiehlt hierfür eine Messdauer von 13 Monaten, um einen überlappenden Vergleichszeitraum zu erhalten. Die klimatische Einordnung erfordert zusätzlich den Vergleich des gesamten Messzeitraums mit geeigneten mehrjährigen Außenklimadaten. Bei aufgabenrelevanten Ausfällen oder ungewöhnlichen Bedingungen ist der Verlängerungsbedarf zu prüfen.

Einzelne Fragestellungen, beispielsweise zum Heizbetrieb, können eine kürzere Messdauer rechtfertigen. Die Verkürzung, ihre Begründung und die daraus folgenden Einschränkungen der Bewertung sind schriftlich im Auftrag festzuhalten.

6.2 Arten von Monitoringsystemen

Die Wahl des Monitoringsystems richtet sich nach der Fragestellung sowie nach den in WTA-Merkblatt 6-12, Kapitel 4 [1], beschriebenen Anforderungen. Vorab ist zu prüfen, welche technischen, logistischen, personellen und finanziellen Möglichkeiten bestehen und ob Einschränkungen vorliegen, beispielsweise bei der Strom- oder Internetversorgung. Anforderungen an den Brandschutz sind zu beachten. Bei öffentlich zugänglichen Bereichen sind außerdem Diebstahl- und Vandalismusschutz, die gestalterische Einbindung und gegebenenfalls die Information der Besucher zu berücksichtigen.

6.2.1 Temporäres oder dauerhaftes System

Ein Monitoringsystem kann für eine begrenzte Messkampagne oder für eine dauerhafte Überwachung ausgelegt werden. Messdauer, Messintervall, Datenverfügbarkeit, Zugänglichkeit, Energieversorgung und Wartungsaufwand sind gemeinsam zu bewerten. Bei batterieversorgten Messknoten muss die Laufzeit für das vorgesehene Mess- und Übertragungsintervall nachgewiesen werden; notwendige Batteriewechsel sind einzuplanen. Werden Daten zeitnah benötigt, ist eine geeignete Übertragung per Kabel, Funk oder Mobilfunk vorzusehen. Für dauerhafte Installationen können kabelbasierte Systeme Vorteile bei Energieversorgung und Wartung bieten. Die Datensicherheit hängt bei allen Systemen zusätzlich von lokaler Speicherung, Ausfallüberwachung und Datensicherung ab.

6.2.2 Messüberwachung mit autonomen Messknoten

Autonome Messknoten können sich für kleine Messnetze eignen. Sensorqualität, Positionierung, Speicherkapazität und Batterielaufzeit sind zu prüfen. Bei Geräten ohne Fernübertragung stehen die Daten erst nach dem manuellen Auslesen zur Verfügung. Geräte mit Mobilfunkanbindung ermöglichen einen zeitnahen Abruf, benötigen jedoch eine ausreichende Netzabdeckung und einen geeigneten Übertragungsdienst.

6.2.3 Erweiterbarkeit und Flexibilität des Systems

Ein erweiterbares Monitoringsystem ermöglicht es, zunächst ein Basismonitoring einzurichten und bei Bedarf weitere Messstellen oder Messgrößen zu ergänzen. Dazu können beispielsweise CO_2, Licht sowie Tür- und Fensterzustände gehören. Verfügbare Schnittstellen, zusätzliche Kosten und Auswirkungen auf Energieversorgung und Datenerfassung sind bereits im Konzept zu berücksichtigen.

6.2.4 Archivierung

Die Archivierung ist Bestandteil des Monitoringkonzepts. Festzulegen sind die lokale Speicherung, die Übertragung, regelmäßige Sicherungen und die langfristige Verfügbarkeit. Autonome Messknoten speichern üblicherweise im Gerät; vernetzte Systeme können lokal und zusätzlich in einer Cloud speichern. Eine unterbrochene Datenübertragung darf nach Möglichkeit nicht zum Verlust der vor Ort erfassten Messwerte führen. Vollständige Rohdaten müssen mit Zeitstempel, Messstellenbezeichnung, Einheit und Angaben zur Messkonfiguration erhalten bleiben. Für die Übergabe sind dokumentierte, allgemein lesbare Formate, beispielsweise CSV oder Textdateien, zu vereinbaren. Eine verschlüsselte Speicherung oder Übertragung ist damit vereinbar, sofern die berechtigten Beteiligten dauerhaft auf die Daten zugreifen können. Zugriffsrechte, Datenübergabe und Aufbewahrungsdauer sind vertraglich festzulegen.

Mindestfelder einer Datenarchivierung sind Messstellen-ID, Sensor-ID, Zeitstempel mit Zeitzonenbezug, Messgröße, Einheit, Messwert. Dateikodierung, Dezimalzeichen, Spaltentrenner und Kennzeichnung fehlender oder ungültiger Werte sind in einer Formatbeschreibung festzulegen. Die Sensordokumentation muss jede Sensor-ID mit Messort, Konfiguration und Prüfhistorie verknüpfen. Vollständiger Export, Dokumentation und Nutzbarkeit der übergebenen Dateien sind nach Vertragsende sicherzustellen. Eine Vorlage für die Sensordokumentation enthält Anhang A.2 (Tabelle A.2).

6.2.5 Webbasierte Visualisierung

Eine webbasierte Visualisierung kann Auftraggebern und Auftragnehmern während der Messung Zugang zu aktuellen und früheren Klimadaten geben. Sie unterstützt auch die Funktionskontrolle des Messsystems. Anforderungen an Aktualität, Zugriffsrechte und gegebenenfalls Alarmmeldungen sind im Konzept festzulegen. Zusätzlich ist zu vereinbaren, ob Zwischenberichte benötigt werden, wann diese vorliegen sollen und welche Fragen sie beantworten müssen.

Sofern Warnmeldungen beauftragt sind, sind Auslösekriterium einschließlich zulässiger Dauer, maximale Erkennungs- und Übertragungszeit und Empfänger festzulegen. Zusätzlich sind Messstellen-, Energieversorgungs- und Kommunikationsausfälle zu dokumentieren. Für jeden Alarm ist zu bestimmen, wer innerhalb

Freiexemplar

welcher Zeit welche Handlung ausführt. Für die fachlichen Grenz- und Schwellenwerte gilt die Begriffsbestimmung in Kapitel 2.

6.2.6 Vor- und Nachteile der verschiedenen Monitoringsysteme

Autonome Messknoten lassen sich ohne Vernetzung flexibel platzieren, beispielsweise in Vitrinen. Den dafür erforderlichen Energie-, Speicher- und Auslesebedarf beschreibt Kapitel 6.2.2.

Funkbasierte Systeme lassen sich häufig mit geringem Verkabelungsaufwand installieren. Bei batterieversorgten Geräten beeinflussen Mess- und Übertragungsintervall die Laufzeit. Funkverbindung und Erreichbarkeit für Wartung oder Batteriewechsel sind am vorgesehenen Messort zu prüfen. Oberflächentemperatur- und Nahfeldsensoren können über kurze Kabel mit einem Funkknoten verbunden sein.

Kabelbasierte Systeme erfordern eine abgestimmte Leitungsführung und können beispielsweise über einen Datenbus vernetzt werden. Bei zentraler Energieversorgung erhöhen kurze Messintervalle den Batteriewartungsaufwand nicht. Für alle Systemarten sind eine gemeinsame Zeitbasis, die Synchronisation der Geräte und der Umgang mit Uhrzeitabweichungen festzulegen. Ein kabelbasiertes System gewährleistet die zeitliche Vergleichbarkeit nicht allein durch seine Bauart. Tabelle 3 fasst typische Vor- und Nachteile zusammen.

System	Vorteile	Nachteile
Autonome Messknoten	• Flexibel platzierbar; • lokale Speicherung	• Manuelles Auslesen bei fehlender Übertragung; • Batterie- und Speicherkapazität prüfen; • Uhren synchronisieren
Funkbasiertes System	• Geringer Verkabelungsaufwand; • zeitnahe Übertragung möglich	• Funkabdeckung und Energieversorgung prüfen; • bei Batteriebetrieb Wartung erforderlich
Kabel- oder busbasiertes System	• Zentrale Energieversorgung möglich; • kurze Messintervalle und laufender Datenzugriff	• Leitungsführung und Installation abstimmen; • Strom- und Systemausfälle absichern

Tabelle 3 Vor- und Nachteile verschiedener Monitoringsysteme

Freiexemplar

6.2.7 Umfang der Messdatenerfassung – Dichte des Messnetzes

Als Basis der erforderlichen Qualität und Quantität der Messdaten des Monitorings sind folgende Fragestellungen zur Erstellung des Konzepts vorab zu klären:

- Können klimatische Kurzzeitschwankungen auftreten?
- Welche Anforderungen an Messqualität und Ansprechzeit müssen die Sensoren erfüllen?
- Wie dicht muss das Messnetz gewählt werden, damit die Fragestellung bearbeitet werden kann?
- Mit welchen Störquellen muss gerechnet werden?

6.2.8 Messintervall

Das Messintervall ist anhand der Fragestellung, der erwarteten Änderungsgeschwindigkeit und der Ansprechzeit der Sensoren festzulegen. Für die Untersuchung nutzungsbedingter oder kurzfristiger Veränderungen sind in der Regel Messintervalle von höchstens 10 Minuten anzustreben; schnellere Vorgänge können kürzere Intervalle erfordern. Längere Intervalle können bei langsam veränderlichen Bedingungen ausreichen, müssen aber fachlich begründet werden. Die Auswirkungen auf die Erfassung kurzer Ereignisse sind anzugeben. Eine lange Gesamtmessdauer ersetzt keine ausreichende zeitliche Auflösung. Mess-, Speicher- und Übertragungsintervall sind getrennt zu vereinbaren.

6.2.9 Messparameter

Im Monitoringkonzept sind die benötigten Messgrößen und die dafür geeigneten Sensorarten festzulegen. Das gewählte System muss diese Größen mit ausreichender Genauigkeit und zeitlicher Auflösung erfassen und speichern können. Tabelle 4 enthält Beispiele häufig eingesetzter Sensorarten und zugehöriger Messgrößen.

Messgröße	Einheit	Sensorprinzip/Verfahren (Beispiele)	Aufgabenbezug
Lufttemperatur	°C	Widerstandsthermometer/ Thermistor	Außen-, Raum-, Mikro- und Nahfeldklima
Relative Luftfeuchte	% r. F.	Kapazitiver Feuchtesensor	Außen-, Raum-, Mikro- und Nahfeldklima
Oberflächentemperatur	°C	Kontaktfühler; berührungslos mit begründetem Emissionsgrad	Oberflächenbezogene Bewertung
Luftströmung	m/s	Thermisches oder Ultraschall-Anemometer	Luftbewegung im Raum und am Objekt
CO_2-Konzentration	ppm	Nichtdispersive Infrarotmessung (NDIR)	Nutzungs- und Lüftungseinflüsse
Flüchtige organische Verbindungen (VOC)	µg/m³, ppb oder Index	Stoffspezifisches Verfahren bzw. definierter Sensor; Kalibrierung angeben	Luftqualität und Schadstoffquellen
Tür-/Fensterzustand	0/1; Bedeutung festlegen	Magnetkontakt	Zuordnung von Öffnungsereignissen
Globalstrahlung	W/m²	Pyranometer	Solare Einträge
UV-Bestrahlungsstärke/UV-Bestrahlung	W/m²/J/m²	UV-Radiometer; Spektralbereich und Integration angeben	Strahlungsexposition am Objekt
IR-Bestrahlungsstärke	W/m²	Radiometrisches Verfahren; Spektralbereich angeben	Wärmestrahlung am Objekt
Beleuchtungsstärke/Belichtung	lx/lx · h	Luxmeter; zeitliche Integration	Natürliche/künstliche Beleuchtung
Niederschlagshöhe/-intensität	mm/mm je Zeiteinheit	Niederschlagsmesser; Integrationszeit angeben	Außenklima
Regenereignis	Ja/Nein	Benetzungssensor	Zeitliche Zuordnung von Niederschlag
Windgeschwindigkeit/-richtung	m/s/°	Anemometer/Windrichtungsgeber	Außenklima
Weg-/Rissbreitenänderung	mm	Wegaufnehmer; Messspanne angeben	Thermisch-hygrische Verformungen
Schwinggeschwindigkeit/Beschleunigung	mm/s/m/s²	Geschwindigkeits- oder Beschleunigungssensor; Frequenzbereich und Kennwert angeben	Schwingungen und Erschütterungen

Tabelle 4 Messgrößen und beispielhafte Messverfahren

Freiexemplar

6.3 Messpositionen

Sensorpositionen müssen in Abhängigkeit von der Fragestellung, der Problematik, dem Material und den vorhandenen Schäden ausgewählt werden. Wichtig ist es, neben der Raumschale auch weitere sensible Bereiche messtechnisch zu überprüfen (z. B. Inventar, Orgel, Wand-, Decken-, Boden- und Glasoberflächen sowie Laibungen). Dabei sollte darauf geachtet werden, die unterschiedlichen Höhenlagen im Raum mitzuerfassen.

Repräsentative Messstellen beschreiben die für Nutzung und Objekt maßgeblichen Bereiche; gezielt kritische Messstellen untersuchen begründete Verdachtsstellen, etwa kalte Oberflächen oder schlecht belüftete Nischen. Eine räumliche Vorerkundung dient zur Prüfung der Messnetzdichte. Ihr Umfang ist bei Bedarf als eigene Leistung vorzusehen.

Die Sensorpositionen sind vor Ort mit den zuständigen Restauratoren, Denkmalpflegern und Nutzern abzustimmen. In der Vorplanung sollten die vorgesehenen Messstellen bereits in geeigneten Plänen eingetragen werden. Optische Beeinträchtigungen sind möglichst gering zu halten. In öffentlich zugänglichen Bereichen ist das System gegen unbeabsichtigte Berührung und Manipulation zu sichern. Anhang A.1 zeigt die Verortung der Messstellen in einer Planunterlage (Bild A1).

Die Installation an empfindlichen Oberflächen, beispielsweise Wandmalereien, Inventar oder Glasmalereien, ist restauratorisch zu begleiten beziehungsweise durch einen Restaurator auszuführen. Erforderliche Abstimmungen mit den Genehmigungsbehörden sind vorab vorzunehmen. Dies gilt auch für den Rückbau der Sensoren (siehe Kapitel 6.4).

Nachfolgend werden exemplarisch einige Fragen aufgelistet, die zusätzlich zu den bereits benannten Vorplanungen bzgl. der Messtechnik im Rahmen der Konzepterstellung berücksichtigt und besprochen werden sollten:

- Benötigt das Messsystem einen Stromanschluss oder ist es batteriebetrieben?
- Müssen die Komponenten während des Monitoringzeitraums gewartet werden?
- Können die Komponenten bei Bedarf erreicht werden oder sind technische Hilfsmittel notwendig?
- Sind Absperrmaßnahmen während der Installationsarbeiten oder während der Monitoringphase notwendig? Wenn ja, welche?
- Sind Schutzmaßnahmen im Hinblick auf Tiersicherung, Diebstahl oder weitere Einflüsse erforderlich?
- Ist eine Internetanbindung für eine mögliche Datenübermittlung vorhanden oder kann diese hergestellt werden? Welche Schnittstelle für die Anbindung an das Internet kann ggf. genutzt werden?

6.4 Befestigung der Sensoren

Die Befestigung von Kabeln und Sensoren an historischen Oberflächen ist restauratorisch zu planen und mit der Denkmalpflege abzustimmen. Befestigungsmethode und Rückbau sind vor Beginn festzulegen. Temporäre Trenn- oder Schutzschichten, beispielsweise aus Cyclododekan, sind keine allgemeine Standardbefestigung. Materialverträglichkeit, Auftrag, Rückstände, Sublimationsverlauf, Messbeeinflussung und sicherer Rückbau sind für den konkreten Aufbau zu prüfen und zu dokumentieren. Die Fachliteratur zu konservatorischen Anwendungen [8] ersetzt diesen objektspezifischen Nachweis nicht. Sublimation kann Befestigung und Sensorabstand verändern; regelmäßige Kontrollen müssen verhindern, dass der Klebstoff die historische Oberfläche berührt. Auch mechanische Befestigungen und Befestigungen an Fehlstellen sind objektspezifisch zu prüfen. Die Messstelle ist gegen Berührung zu schützen; Ausgangs- und Rückbauzustand sind zu dokumentieren. Beispiele für Übersichts- und Detailaufnahmen enthält Anhang A.3 (Bild A2 und Bild A3).

Prüfexemplar

6.5 Messgrößen und Messgenauigkeit

Die Anforderungen an Sensoren richten sich nach der Fragestellung und dem zu untersuchenden Wertebereich. Neben der Messabweichung sind Auflösung, Ansprechzeit, Langzeitstabilität und Einbausituation zu berücksichtigen. Bei einer gemeinsamen Auswertung müssen die Messwerte verschiedener Sensoren ausreichend vergleichbar sein; unterschiedliche Güteklassen sind zu dokumentieren und bei der Bewertung einzubeziehen. Während Tabelle 4 Messgrößen und Verfahren erläutert, zeigt Tabelle 5, wie die Anforderungen und Nachweise projektbezogen festzulegen sind.

Die Bauart von Sensoren und Datenloggern beeinflusst das Messergebnis. Gehäuse können den Luftaustausch begrenzen und die Reaktion auf Klimaschwankungen verzögern. Auch Eigenerwärmung elektronischer Komponenten kann Temperatur- und Feuchtemessungen verfälschen, insbesondere bei eng integrierten Messgeräten. Diese Einflüsse sind bei der Gerätewahl, der Installation und der Interpretation kurzfristiger Änderungen zu berücksichtigen.

Vergleichsmessungen vor Beginn des Monitorings werden empfohlen. Sie können Abweichungen zwischen Geräten aufzeigen, ersetzen jedoch keine Kalibrierung mit geeigneter Referenz. Bei Bedarf sind Kalibrierung oder Justierung vor der Installation vorzunehmen. Vergleichsbedingungen, Ergebnisse und gegebenenfalls verwendete Korrekturen sind zu dokumentieren; Kontrollen während und nach der Messung sind entsprechend der Aufgabenstellung einzuplanen.

Konzept und Leistungsbeschreibung legen die ggf. erforderlichen Kalibrierungen und Nachweise fest. Zu dokumentieren sind Sensor-ID, Verfahren, Referenz und Rückführbarkeit, Messbereich, Kalibrierpunkte, Datum, Ergebnisse, anzuwendende Korrekturen sowie zugehörige Unsicherheiten. Prüfungen während und nach der Messkampagne sowie Anlässe für Wiederholung oder Austausch sind nach Einsatzbedingungen festzulegen. Die nachgewiesene Eignung im relevanten Wertebereich ist Teil der Inbetriebnahmeprüfung. Für Temperaturmessungen gilt DIN EN 15758:2010-12 [5], für Luftfeuchte DIN EN 16242:2013-03 [7].

Messgröße	**Planungsbeispiel / festzulegende Kenngröße**	**Erforderlicher Beleg und Gültigkeitsangaben**
Lufttemperatur	Messabweichung ±0,2 °C	Messbereich, Umgebungsbedingungen, Sensor-/Gerätetyp, Datenblattstelle und Kalibriernachweis
Relative Luftfeuchte	Messabweichung ±2,5 % r. F.	Gültiger Feuchte- und Temperaturbereich; absolute/relative Anteile; Datenblattstelle und Kalibriernachweis
Oberflächentemperatur	Messabweichung ±0,2 °C	Messbereich und Einbaueinflüsse; bei IR-Messung Emissionsgrad, Messfleck und Reflexionseinfluss; Kalibriernachweis
Luftströmung / CO_2	Projektbezogen: ±(a in Einheit + b % vom Messwert)	a, b, Messbereich, Bedingungen und Belegstelle vollständig angeben; Beispielwerte sind keine Geräteangaben
Globalstrahlung	Messabweichung und Nichtlinearität getrennt angeben	Gerätespezifikation, Spektralbereich, Richtungs- und Temperatureinfluss; Kalibrierung
Windgeschwindigkeit/-richtung	Absolute und gegebenenfalls relative Anteile festlegen	Bereich, Ansprechverhalten, Aufstellung und Nachweis
Wegmessung	Abweichung in mm oder als Anteil einer eindeutig bezeichneten Messspanne	Bezugsgröße, Messspanne, Nichtlinearität, Temperatur- und Befestigungseinfluss

Tabelle 5 Planungsbeispiele und Nachweise zur Sensorspezifikation

Freiexemplar

6.6 Erfassung von Randbedingungen

Die für die Fragestellung wesentlichen Randbedingungen sind zu erfassen oder nachvollziehbar zu dokumentieren. Welche Angaben benötigt werden, ist im Monitoringkonzept festzulegen. Ohne diese Informationen können Ursachen klimatischer Veränderungen häufig nicht belastbar zugeordnet werden. Beispiele sind:

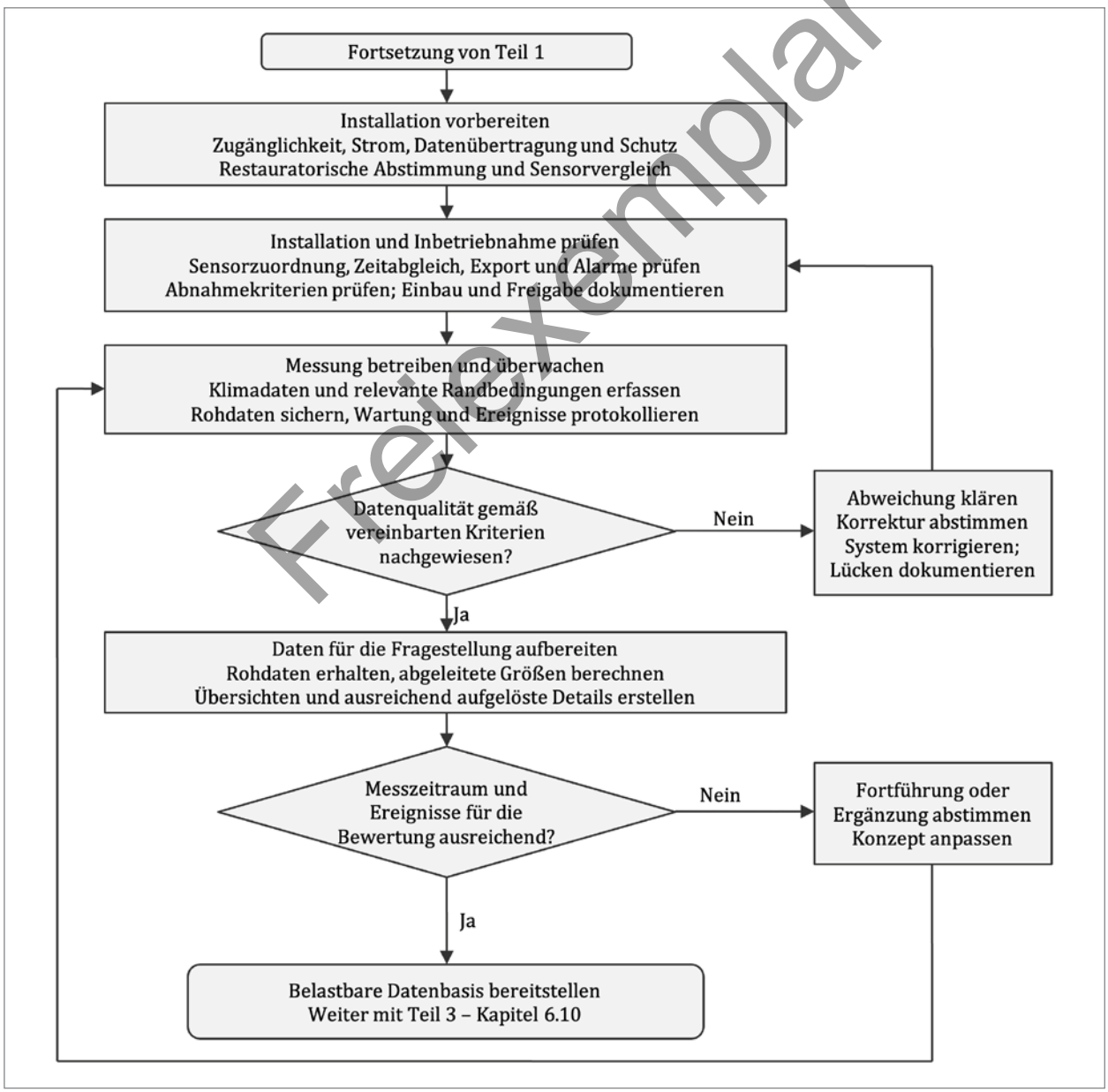
- Status Fenster/Türen
- Nutzungsdaten
- Betriebszustände von Heizung/Temperierung, Lüftung, Befeuchtung, Entfeuchtung und gegebenenfalls Kühlung
- Staubaufkommen und besondere Betriebsereignisse

Für die relevanten technischen Anlagen sind neben Sollwerten nach Möglichkeit tatsächlicher Ein-/Aus-Zustand, Stellgrößen oder Laufzeiten zu erfassen. Quelle, zeitliche Auflösung und Zeitbasis der Angaben sind anzugeben. Automatisch erfasste Zustände und manuell protokollierte Beobachtungen sind unterscheidbar zu kennzeichnen. Bei beauftragten Aufgaben zum Lüftungsmanagement ist DIN EN 15759-2:2018-03 [9] aufgabenbezogen heranzuziehen. Die gemeinsame Darstellung von Klima- und Statusdaten veranschaulicht Bild B5 in Anhang B.2.

6.7 Durchführung, Überwachung und Dokumentation der Messung

Die Installation des Messsystems und seine Überwachung sind Aufgabe des Ausführenden. Er hat Sorge zu tragen, dass die erforderlichen Messdaten in der vereinbarten Qualität für den vereinbarten Messzeitraum erfasst und archiviert werden. Notwendige Hilfsmittel zur Installation, wie z. B. Leitern, Gerüste oder Hubsteiger, sind mit dem Auftraggeber abzusprechen. Sollte der Ausführende für die Überwachung und mögliche Instandsetzungen des Messsystems einen weiteren Unterauftragnehmer einschalten, so ist auch dies mit dem Auftraggeber im Vorfeld abzustimmen. Das Einschalten eines Unterauftragnehmers entbindet den Auftragnehmer nicht von seiner Verpflichtung zur Lieferung der bestellten Messdaten in der vereinbarten Qualität.

Vor Messbeginn sind je Messreihe erwartete Wertzahl, Mindestanteil gültiger Werte, längste zulässige zusammenhängende Lücke sowie Kontroll-, Melde- und Wiederherstellungsfristen festzulegen. Datenverfügbarkeit ist als Zahl gültiger Werte geteilt durch die für den vereinbarten Zeitraum erwartete Wertzahl auszuweisen; Gesamtquote und längste Lücke sind gemeinsam zu beurteilen. Kritische Ereigniszeiträume können strengere Anforderungen erfordern. Die Inbetriebnahmeprüfung umfasst Messstellenzuordnung, Zeitabgleich, Datenexport, Sicherung und ggf. vereinbarte Alarme. Bei Abweichungen sind Ursache, Auswirkungen auf die Fragestellung und Maßnahmen mit dem Auftraggeber abzustimmen. Allgemeine Prozentwerte ersetzen keine aufgabenbezogene Festlegung. Den Ablauf von Installation, Messbetrieb und Datenprüfung zeigt Bild 4.



Freiexemplar

Bild 4 Ausführlicher Flussplan zum Klimamonitoring, Teil 2 von 3 – Installation und Durchführung

Das installierte Messsystem ist in einem Installationsprotokoll zu beschreiben und die durchgeführten Messungen sind zu dokumentieren. Das Installationsprotokoll muss mindestens folgende Punkte beinhalten:

- Position der Messstellen: Jede Messstelle ist durch eine eindeutige ID, ihre Lage im Plan, eine Messstellen- und Sensorliste sowie mindestens eine Übersichts- und eine Detailaufnahme zu dokumentieren. Abweichungen von diesen Dokumentationsanforderungen sind vorab zu begründen; die eindeutige Lagezuordnung ist durch eine gleichwertige Beschreibung sicherzustellen. Anhang A ergänzt diese Anforderungen durch Plan-, Listen- und Fotobeispiele; eine ausfüllbare Vorlage enthält Tabelle A.2 in Anhang A.2.
- Installierte Messkonfiguration: Die Sensorliste enthält Sensor-ID/Seriennummer, Messstellen-ID, Messgröße, Einheit, Messbereich, Gerätespezifikation, Kalibriernachweis, Korrektur, Mess- und Speicherintervall sowie Einbau-, Austausch- und Rückbaudaten. Zeitbasis, Zeitzone einschließlich Sommerzeitregelung und Synchronisation sind zu dokumentieren. Änderungen erhalten Datum, Verantwortlichen und Anlass; die Liste wird einmalig angelegt und fortlaufend aktualisiert. Die Dokumentation weist die Umsetzung einschließlich begründeter Abweichungen vom Konzept nach. Für die Auswahl gelten Kapitel 6.5 und 6.2.8.

Form, Umfang und Übergabetermine der Dokumentation sind in der Leistungsbeschreibung festzulegen. Zusätzlich zur Messstellen- und Sensorliste sind mindestens folgende Angaben erforderlich:

- Dauer des Monitorings
  Es ist die Dauer der Messung anzugeben. Unterbrechungen der Messung und deren Ursachen sind ebenso zu dokumentieren.
- Nicht messtechnisch erfasste Randbedingungen
  Relevante Angaben, beispielsweise zu Fensteröffnungen, Veranstaltungen oder Anlagenbetrieb, sind mit Zeitpunkt und Herkunft der Information zu dokumentieren. Unsicherheiten und fehlende Angaben sind kenntlich zu machen.
- Vorkommnisse
  Besondere Vorkommnisse, beispielsweise die Aufstellung eines Gerüsts an der Fassade, der Ausfall von Messgeräten oder Stromausfälle, sind zu dokumentieren. Hier ist es wichtig, die Art der Besonderheit und den Zeitraum zu erfassen.

6.8 Aufbereitung der Messdaten

Der Auftragnehmer bereitet die Messdaten entsprechend der vereinbarten Fragestellung auf. Dazu gehören eine dokumentierte Plausibilitätsprüfung, die Kennzeichnung von Datenlücken und die Berechnung abgeleiteter Größen, beispielsweise absoluter Luftfeuchte und Taupunkttemperatur. Diagramme müssen Messgrößen, Einheiten, Messstellen und Zeitraum eindeutig angeben und eine verständliche Legende enthalten. Farben und Linienarten sind über alle Darstellungen hinweg konsistent zu verwenden. Ergänzende Hinweise zur grafischen Darstellung enthält Anhang B.1.

Rohdaten werden unverändert und mit nachvollziehbarer Herkunft archiviert. Arbeitskopien erhalten Qualitätskennzeichen; fehlende, ungültige, korrigierte und abgeleitete Werte bleiben unterscheidbar. Ausschlüsse, Korrekturen, Interpolation und gegebenenfalls Aggregation sind mit Anlass, Zeitraum, Verfahren, Parametern und Softwareversion zu protokollieren. Abgeleitete Größen müssen auf ihre Eingangsreihen und Berechnungsansätze zurückgeführt werden können. Lücken gelten nicht als unkritische Zeiträume. Für Schwellenüberschreitungen sind auswertbare Dauer und unbekannte Dauer getrennt auszuweisen; interpolierte Werte dürfen Messnachweise nicht ersetzen.

Bei farbigen Darstellungen kann folgende Zuordnung verwendet werden:

- Temperaturen → Rottöne
- Relative Luftfeuchten → Blautöne
- Absolute Feuchte → Grüntöne
- Luftströmungen → Gelbtöne
- Status Fenster und Türen → Grautöne
- Licht → Violetttöne

Die Darstellungen müssen auch im Ausdruck gut lesbar sein. Unterscheidbare Linienarten und eindeutige Beschriftungen ergänzen die Farben.

Für Überblick und Detailauswertung können unterschiedliche Darstellungsauflösungen verwendet werden. Auswahl und Aufbereitung sind anzugeben. Die Bewertung kurzer Ereignisse muss auf den hierfür ausreichend aufgelösten Messwerten beruhen; eine geglättete oder ausgedünnte Übersicht ersetzt diese nicht.

Freiexemplar

- Ein Jahresgang mit stündlichen Werten kann einen Überblick geben. Die Auswahl der Werte beziehungsweise eine erfolgte Aggregation ist offenzulegen; kurzzeitige Spitzen können in einer solchen Darstellung fehlen.
- Zur Untersuchung von Extremwerten und Kurzzeitschwankungen sind kurze Zeitabschnitte mit ausreichend hoher Auflösung darzustellen. Ein Monatsjournal kann beispielsweise eine auf 15 Minuten verdichtete Übersicht enthalten; eine solche Verdichtung ist kenntlich zu machen. Für die Bewertung gelten die oben genannten Anforderungen an die Originalmesswerte. Ein Tagesdetail zeigt bei Bedarf alle verfügbaren Messpunkte.

Darstellungsauflösung, Diagrammformen und Übergabeformate sind im Monitoringkonzept festzulegen. Rohdaten und bearbeitbare Auswertungen sind in vereinbarten, allgemein nutzbaren Formaten zu übergeben. Gemeinsam zu bewertende Zeitreihen müssen sich auf derselben Zeitachse darstellen lassen.

6.9 Auswertung und Bewertung der Messdaten

Die Messdaten sind entsprechend der beauftragten Fragestellung auszuwerten und zu bewerten. Form und Umfang der Ergebnisübergabe sind in der Leistungsbeschreibung zu vereinbaren; ein schriftlicher Bericht ist vorzusehen. Eine Präsentation kann ihn ergänzen. Die Dokumentationsanforderungen der zuständigen Denkmalbehörden sind zu berücksichtigen. Die Bewertung sollte mindestens folgende Inhalte umfassen:

- Schriftliche Ausarbeitung der Frage- bzw. Problemstellung
- Bewertung der Klimadaten im Zusammenhang mit der Fragestellung, z. B. in Bezug auf klimatische Schwankungen, Extremereignisse und deren Ursachen, Salzphasenwechsel, biogenen Befall, Tauwasserausfall sowie den Betrieb von Heizung und Lüftung
- Beantwortung der Frage- bzw. Problemstellung mit Begründung
- Grafische Darstellung der Klimadaten zur Einordnung der Befunde (z. B. Klimadiagramme der Messstellen im Zusammenhang mit Salzphasenwechseln, biogenem Befall oder Tauwasserausfall)

Der Bericht nennt die Abdeckung der relevanten Zeiträume, fehlende Daten und Randbedingungen, Mess- und Modellunsicherheiten sowie die Auswirkungen auf die Beantwortung der Fragestellung. Messbefund, Rechenergebnis, Ursachenhypothese und Empfehlung sind getrennt darzustellen. Ein rechnerisches Schädigungspotenzial ist kein Nachweis eines tatsächlich eingetretenen Schadens. Die methodischen Grundlagen enthält Kapitel 8; Anhang B.2 zeigt geeignete Diagrammformen und ihre Anwendungsgrenzen.

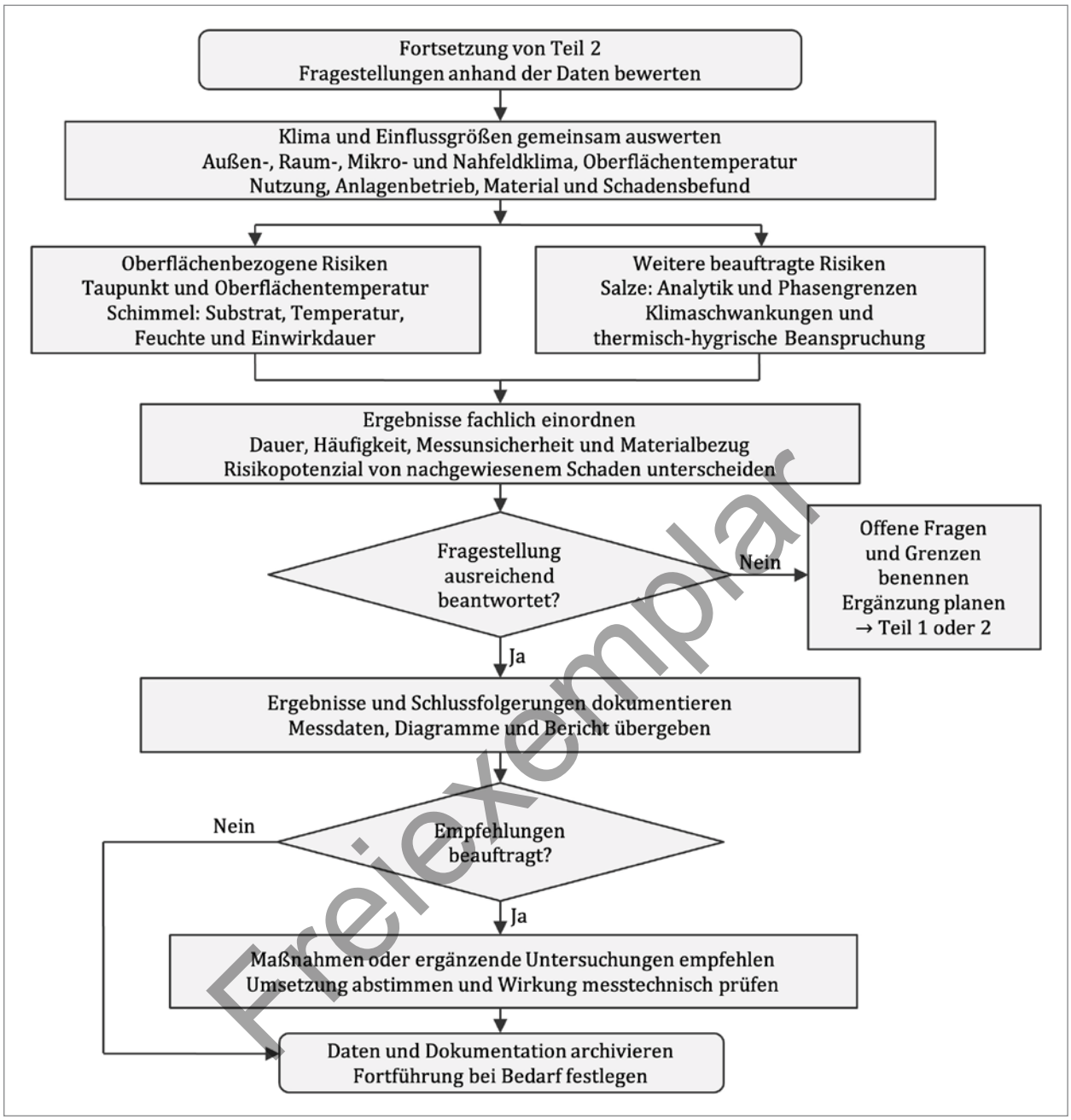
6.10 Empfehlungen aus den Ergebnissen des Klimamonitorings

Soweit beauftragt, sind aus der Bewertung Empfehlungen abzuleiten. Diese können betriebliche oder konservatorische Maßnahmen betreffen, beispielsweise eine angepasste Lüftung, Besucherlenkung oder Temperierung. Wenn die Daten für eine Entscheidung nicht ausreichen, sind ergänzende Untersuchungen oder eine Fortführung des Monitorings zu empfehlen.

Jede beauftragte Maßnahmenempfehlung benennt Ziel, Priorität, verantwortliche Beteiligte, Voraussetzungen und erwartete Auswirkungen. Nutzen und mögliche Nachteile für Erhaltung, Betrieb und Ressourcen sind objektspezifisch abzuwägen. Für die Wirkungskontrolle sind Messgrößen, Vergleichszeiträume und Erfolgskriterien vor Umsetzung festzulegen. Beispiel: Bei einer geänderten Lüftungsstrategie werden Häufigkeit und Dauer belastbar ermittelten Kondensationspotenzials vor und nach der Änderung unter Berücksichtigung von Außenklima und Nutzung verglichen. Ein bloßer Rückgang der Raumluftfeuchte genügt nicht als Erfolgsnachweis.

Die Entscheidungsschritte von der Bewertung bis zu ergänzenden Untersuchungen und Empfehlungen sind in Bild 5 dargestellt.

Freiexemplar



Freiexemplar

Bild 5 Ausführlicher Flussplan zum Klimamonitoring, Teil 3 von 3 – Bewertung und weiteres Vorgehen

7 Leistungsbeschreibung

Eine möglichst präzise Leistungsbeschreibung soll die Vergleichbarkeit von Angeboten gewährleisten. Der Vorspann mit vertraglichen Rahmenbedingungen ist nicht Gegenstand dieses Merkblatts. Erwähnt sei aber, dass die Anbieter im Vorspann darauf hingewiesen werden können, dass ggf. Nebenangebote zulässig sind und unabhängig von der Leistungsbeschreibung geprüft werden. Das bedeutet, dass der Anbieter nach Prüfung der Leistungsbeschreibung weitere, ihm wichtig erscheinende Themen oder Präzisierungen zum Klimamonitoring ergänzen kann. Die dafür anfallenden Kosten sind entsprechend in einem Nebenangebot zu listen.

Bei der Erstellung der Leistungsbeschreibung sind die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Punkte anhand der Aufgabenstellung zu prüfen und eindeutig festzulegen. Bereits vorliegende, für das Klimamonitoring relevante Unterlagen zum Objekt sind als Anlagen bereitzustellen.

Die Leistungsbeschreibung unterscheidet aufgabenbezogene Mindestleistungen, bei entsprechender Fragestellung erforderliche Leistungen und ausdrücklich gewählte Optionen. Für jeden Baustein sind Umfang und

Ergebnis festzulegen. Die Beispiele in Tabellen und Anhängen sind ein Auswahlangebot und nicht vollständig in jeden Auftrag zu übernehmen. Verlängerung, zusätzliche Messstellen, Alarmbetrieb oder weiterführende Untersuchungen können als gesonderte Optionen mit eindeutigem Auslöseverfahren beschrieben werden.

Mindestens festzulegen sind:

- Messdauer/Betriebsdauer
- Art des Monitoringsystems
- Messnetzdichte/Anzahl und Art der Sensoren
- Messintervall
- Messpositionen
- Verweis auf restauratorische Begleitung zur Anbringung von Sensoren (sofern es sich um historisch relevante Oberflächen handelt). Hier ist festzulegen, ob diese Leistung im Angebot enthalten sein muss oder gesondert beauftragt wird
- Erfassung von Randbedingungen (was soll erfasst werden und welche Daten müssen korreliert werden, z. B. Türen, Fenster, Wechselwirkung mit der historischen Substanz, Nutzung).
- Dokumentation einschließlich der Verortung der Sensoren und Sonden, der Sensorliste und der Fotodokumentation sowie Festlegung der Dateiformate; dabei sind die Vorgaben der zuständigen Denkmalbehörden zu berücksichtigen
- Aufbereitung der Daten, Übergabe im Rohdatenformat, Präsentation, Auswertung und Bewertung
- Empfehlungen zu Maßnahmen und ergänzenden Untersuchungen, soweit beauftragt

Zur Vollständigkeitsprüfung der Leistungsbeschreibung können die Kurzcheckliste (Tabelle 6), der Überblick in Bild 1 und die Planungsschritte in Bild 3 herangezogen werden.

Zusätzlich sind Kalibriernachweise, Inbetriebnahmeprüfung, Kontrollen und Wartung, Ausfall- und Alarmbehandlung, terminierte Rohdaten- und Berichtslieferungen sowie Rückbau mit Zustandsdokumentation festzulegen. Jede Position nennt Umfang, Verantwortlichkeit, Termin und Prüfkriterium. Tabelle 7 dient als ausfüllbare Vorlage; alle Platzhalter sind vor Beauftragung zu konkretisieren.

Nr.	Prüffrage vor der Beauftragung	Geklärt
1	Welche konkrete Frage soll das Monitoring beantworten, und welche Entscheidung soll es unterstützen?	☐
2	Welche Unterlagen, Voruntersuchungen und Zugänge liegen vor?	☐
3	Welche Messgrößen, repräsentativen und kritischen Messorte sowie Messzeiten sind erforderlich?	☐
4	Wer stimmt Installation, Betrieb und Rückbau ab?	☐
5	Welche Datenqualität, Kontrollen und gegebenenfalls Alarmleistungen werden vereinbart?	☐
6	Welche Rohdaten, Dokumentationen und Berichte sind wann zu liefern?	☐
7	Welche Auswertungen und Empfehlungen werden ausdrücklich beauftragt?	☐

Tabelle 6 Kurzcheckliste für Auftraggeber vor der Beauftragung

Freiexemplar

Leistungsbaustein	Projektbezogene Festlegung
Messauftrag	Messstellen-IDs, Messgrößen, Zeitraum, Mess- und Speicherintervalle
Eignungsnachweis	Wertebereich, Kalibrierung, Referenz, zulässige Abweichung, Unsicherheit, Termin
Inbetriebnahme und Abnahme	Prüfpunkte, Verantwortlicher, Termin, Nachweis, Umgang mit Abweichungen
Datenqualität und Ausfälle	Mindestanteil gültiger Werte, längste Lücke, Kontroll-, Melde- und Wiederherstellungsfrist
Wartung und optionale Alarme	Kontrollen, Intervalle, Alarmkriterien, Empfänger, Reaktion, Funktionsprüfung
Lieferungen	Rohdaten, Qualitätskennzeichen, Metadaten, Formate, Berichte, Termine
Rückbau	Verfahren, Zuständigkeit, Termin, Zustandsdokumentation
Optionen und Auslösung	Zusätzliche Messstellen, Verlängerung, Auswertung, Empfehlungen; Beauftragungsverfahren

Tabelle 7 Vorlage zur Konkretisierung der Leistungsbeschreibung

Freiexemplar

8 Orientierende Bewertungsgrundlagen

8.1 Bewertungsgrundlagen von Klimadaten

Die Bewertung von Klimadaten darf nicht allein anhand einzelner Minimal-, Maximal- oder Grenzwerte erfolgen. Maßgebend sind der zeitliche Verlauf, die Dauer, Häufigkeit und Wiederkehr potenziell kritischer Zustände sowie die räumliche Zuordnung der Messstellen.

Raum-, Nahfeld- und Oberflächenklimadaten sind entsprechend der Fragestellung getrennt auszuwerten und anschließend miteinander in Beziehung zu setzen. Bei oberflächenbezogenen Risiken sind insbesondere das Nahfeldklima und die Oberflächentemperatur zu berücksichtigen.

Auffällige Messwerte sind im Zusammenhang mit Außenklima, Nutzung, Lüftung, Beheizung, Temperierung und sonstigem Anlagenbetrieb sowie mit dem Material- und Schadensbestand zu interpretieren. Einzelne Extremwerte können auf besondere Ereignisse hinweisen, erlauben für sich allein jedoch keine abschließende Risikobewertung.

8.2 Orientierende Bewertung des Kondensationspotenzials

Zur Bewertung möglicher Oberflächenkondensation wird die aus zeitgleich gemessener Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte im Nahfeld berechnete Taupunkttemperatur mit der zugehörigen Oberflächentemperatur verglichen. Der Taupunktabstand ergibt sich aus der Differenz:

$$\Delta T = T_s - T_d$$

T_s Oberflächentemperatur;

T_d Taupunkttemperatur;

ΔT Taupunktabstand in K.

Erreicht oder unterschreitet die Oberflächentemperatur die Taupunkttemperatur, besteht rechnerisch ein Kondensationspotenzial.

Für die Bewertung sind Häufigkeit, Dauer und Wiederkehr geringer oder negativer Taupunktabstände zu berücksichtigen. Ebenso sind Messunsicherheit, zeitliche Auflösung und Lage der Messstellen einzubeziehen. Für belastbare Aussagen sollte die Oberflächentemperatur an der zu bewertenden Stelle möglichst kontinuierlich gemessen werden. Werden Oberflächentemperaturen nur angenähert oder rechnerisch ermittelt, ist die Aussage entsprechend als orientierend zu kennzeichnen. Das daraus resultierende Schadensrisiko ist unter Berücksichtigung des Materials, des Oberflächenzustands und vorhandener Vorschädigungen objektspezifisch zu bewerten. Die qualitative Einordnung ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Ein zugehöriges Diagramm zeigt Bild B4 in Anhang B.2.

Einstufung	Bewertungsmerkmale
geringes Risiko-potenzial	Der Taupunktabstand bleibt unter Berücksichtigung der Messunsicherheit eindeutig positiv. Wiederkehrende Annäherungen an die Taupunkttemperatur oder deren Unterschreitung durch die Oberflächentemperatur werden nicht festgestellt.
erhöhtes Risiko-potenzial	Der Taupunktabstand nähert sich wiederholt 0 K oder liegt im Bereich der Messunsicherheit. Eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur ist nicht eindeutig nachweisbar, kann lokal oder kurzzeitig jedoch nicht ausgeschlossen werden.
hohes Risiko-potenzial	Die Oberflächentemperatur unterschreitet die Taupunkttemperatur unter Berücksichtigung der Messunsicherheit wiederholt oder anhaltend, oder es wird Kondensat beobachtet. Die Folgen sind material- und objektspezifisch zu bewerten.

Tabelle 8 Orientierende Einstufung des Kondensationspotenzials

8.3 Orientierende Bewertung des Schimmelpilzwachstumspotenzials

Klimadaten können das Potenzial für Schimmelpilzwachstum beschreiben, nicht jedoch einen vorhandenen Befall nachweisen. Maßgebend sind die Temperatur und relative Luftfeuchte an beziehungsweise nahe der zu bewertenden Oberfläche sowie Dauer, Häufigkeit und Wiederkehr wachstumsbegünstigender Bedingungen. Raumklimadaten allein sind insbesondere bei kalten, schlecht durchlüfteten oder verdeckten Oberflächen nicht ausreichend.

Für eine orientierende Bewertung können Temperatur-Feuchte-Wertepaare mit den zum Substrat passenden LIMBau-Kurven nach WTA-Merkblatt 6-3 verglichen werden. LIM bezeichnet eine untere Wachstumsgrenze unter den jeweiligen Modellannahmen. LIMBau I steht für biologisch gut verwertbare, LIMBau II für weniger gut verwertbare Substrate. Die Substratzuordnung und das verwendete Modell sind anzugeben. Für die Oberflächenbewertung sind die Bedingungen an der Oberfläche maßgebend. Die relative Oberflächenfeuchte kann aus Nahfeldklima und gemessener Oberflächentemperatur angenähert werden, wenn ein gleicher Wasserdampfpartialdruck im Nahfeld und unmittelbar an der Oberfläche angenommen werden darf.

WTA 6-3-24/D [10] behandelt Isoplethenansätze und das biohygrothermische Verfahren sowie die Einordnung des VTT-Modells. Diese Ansätze unterscheiden sich in Voraussetzungen und Ergebnisgrößen. Isoplethen ordnen Temperatur und Feuchte substratbezogen ein; zeitbezogene Isoplethen können Keimungs- und Wachstumsbedingungen beschreiben. Das biohygrothermische Verfahren berücksichtigt den zeitlichen Feuchtezustand einer modellierten Spore; das VTT-Modell beschreibt die zeitliche Entwicklung eines Schimmelindex. Modell und Fassung, Zeitauflösung, Oberflächenklima, Substratannahmen und Ergebnisgröße sind zu dokumentieren. Die Auswahl richtet sich nach Fragestellung und Datenqualität. Ein einfacher Vergleich mit einer LIM-Kurve ist einer dynamischen Wachstumsberechnung nicht gleichzusetzen.

Die LIMBau-Kurve allein beschreibt weder die Dauer bis zur Keimung noch den Umfang eines Wachstums. Für zeitabhängige Aussagen sind geeignete Isoplethen für Keimung und Wachstum beziehungsweise ein hierfür geeignetes Modell erforderlich. Substrat, Verschmutzung, Oberflächenzustand und vorhandene Feuchteschäden sind einzubeziehen. Tabelle 9 dient ausschließlich einer qualitativen Orientierung und ist keine standardisierte Auswertung des WTA-Modells. Eine klimatische Bewertung weist keinen Befall nach und ersetzt keine restauratorische oder mikrobiologische Untersuchung. Andere Formen biogenen Befalls erfordern jeweils geeignete Bewertungsverfahren.

Freiexemplar

Einstufung	Bewertungsmerkmale
geringes Risikopotenzial	Die Oberflächenbedingungen liegen innerhalb des Gültigkeitsbereichs des gewählten Modells unter der maßgebenden LIMBau-Kurve. Vereinzelte Grenzannäherungen sind unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und zeitlichen Auflösung zu prüfen. Ein vorhandener Befall wird hierdurch nicht ausgeschlossen.
erhöhtes Risikopotenzial	Die maßgebende LIMBau-Kurve wird wiederholt überschritten. Einwirkdauer, Substrat und Oberflächenzustand sind mit geeigneten zeitabhängigen Kriterien zu prüfen; aus Grenzübertritten allein lässt sich kein Wachstum ableiten.
hohes Risikopotenzial	Die für das gewählte Substrat geltenden zeitabhängigen Wachstumsbedingungen sind über relevante Zeiträume erfüllt. Eine vertiefte Untersuchung der Oberfläche und die Prüfung präventiver Maßnahmen sind erforderlich. Ein tatsächlicher Befall ist gesondert nachzuweisen.

Tabelle 9 Qualitative Orientierung zum Schimmelpilzwachstumspotenzial; keine standardisierte Klassifikation nach WTA-Merkblatt 6-3 [10]

8.4 Orientierende Bewertung des Aktivierungspotenzials von Salzphasenwechseln

Salzbedingte Schäden an porösen mineralischen Baustoffen und historischen Oberflächen können durch Lösungs- und Kristallisationsprozesse sowie durch Hydratations- und Dehydratationswechsel verursacht oder verstärkt werden. Maßgebend sind neben Temperatur und relativer Luftfeuchte insbesondere die Art, Konzentration und Verteilung der vorhandenen Salze sowie die Material- und Porenstruktur.

Für die klimatische Bewertung ist das Nahfeldklima an der betroffenen Oberfläche heranzuziehen und bei relevanten Temperaturunterschieden durch die zugehörige Oberflächentemperatur zu ergänzen. Geeignete Salzanalysen ermöglichen einen Vergleich mit salzspezifischen Feuchtebereichen oder Phasengrenzen. Salzgemische können sich anders verhalten als einzelne reine Salze. Neben Häufigkeit und Dauer relevanter Klimazustände sind die Richtung der Änderungen, wiederholte Grenzübertritte und mögliche Verzögerungen der Materialreaktion zu berücksichtigen. Ein rechnerischer Grenzübertritt belegt noch keinen tatsächlich eingetretenen Phasenwechsel oder Schaden.

Ohne Material- und Salzanalytik ist lediglich eine orientierende Einschätzung möglich. Wiederkehrend hohe Feuchten, Taupunktnähe, deutliche Unterschiede zwischen Raum- und Nahfeldklima sowie sichtbare Salz- oder Feuchteschäden können einen weiterführenden Untersuchungsbedarf begründen, belegen jedoch keinen konkreten Salzphasenwechsel. Die Bewertung ist daher stets objektspezifisch und unter Einbeziehung restauratorischer beziehungsweise materialwissenschaftlicher Befunde vorzunehmen. Eine qualitative Orientierung bietet Tabelle 10.

Freiexemplar

Einstufung	Bewertungsmerkmale
Geringes Aktivierungspotenzial	Das vorhandene Salzsystem ist hinreichend bekannt. Die gemessenen Temperatur-Feuchte-Verläufe bleiben unter Berücksichtigung der Messunsicherheit außerhalb der salzspezifisch relevanten Bereiche. Wiederkehrende Durchschreitungen von Phasengrenzen oder Hinweise auf lokale Feuchtebelastungen werden nicht festgestellt.
Erhöhtes Aktivierungspotenzial	Salzspezifisch relevante Feuchtebereiche werden wiederholt erreicht oder kurzzeitig durchschritten. Bekannte oder vermutete Salzbelastungen, lokale Feuchteerhöhungen oder Unterschiede zwischen Raum- und Nahfeldklima erhöhen die Relevanz. Ergänzende Material- und Salzuntersuchungen können erforderlich sein.
Hohes Aktivierungspotenzial	Bei bekanntem Salzsystem treten wiederholt klimatische Bedingungen auf, die relevante Phasenänderungen begünstigen. Häufige Wechsel und ausreichend lange Einwirkzeiten sind gemeinsam zu bewerten. Sichtbare Salz- oder Feuchteschäden und empfindliche Oberflächen begründen eine vertiefte Untersuchung.

Tabelle 10 Orientierende Einstufung des Aktivierungspotenzials von Salzphasenwechseln

Liegt keine Salzanalytik vor, sollte nicht automatisch ein »geringes Aktivierungspotenzial« ausgewiesen werden. Fehlende Untersuchungsergebnisse sind kein Nachweis dafür, dass keine Salzbelastung vorhanden ist. In diesem Fall ist die Formulierung vorzuziehen: Eine salzspezifische Bewertung ist auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht abschließend möglich. Die Klimadaten erlauben lediglich eine orientierende Einschätzung der Feuchte- und Schwankungsbedingungen.

8.5 Kennwerte zur Bewertung kurzfristiger Klimaschwankungen

Kurzfristige Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte können bei hygroskopischen und mehrschichtig aufgebauten Materialien Feuchteaufnahme und -abgabe, Quell- und Schwindvorgänge sowie mechanische Spannungen auslösen. Ihre Relevanz hängt insbesondere vom Änderungsbetrag, der Änderungsgeschwindigkeit, der Einwirkdauer, der Wiederkehr sowie von der Reaktionsfähigkeit und Empfindlichkeit des betrachteten Materials ab.

Temperatur und relative Luftfeuchte sind gemeinsam auszuwerten, da Änderungen der relativen Luftfeuchte auch durch Temperaturänderungen verursacht werden können. Für die objektbezogene Bewertung ist zudem zu prüfen, ob die im Raumklima festgestellten Schwankungen auch im Nahfeld empfindlicher Oberflächen wirksam werden.

Allgemeingültige Grenzwerte für zulässige kurzfristige Klimaschwankungen können nicht angegeben werden. Die Bewertung ist unter Berücksichtigung des historischen Klimas, des Material- und Schichtenaufbaus, vorhandener Schäden sowie der Messunsicherheit objektspezifisch vorzunehmen. Die hierfür relevanten Bewertungsaspekte sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

Bewertungsaspekt	Hinweise zur Auswertung
Änderungsbetrag und Änderungsgeschwindigkeit	Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte innerhalb objektspezifisch festgelegter Zeitfenster ermitteln. Die Zeitfenster sind an Messintervall, Fragestellung und Materialreaktion anzupassen.
Dauer und Wiederkehr	Einzelne kurzzeitige Ereignisse sind von wiederkehrenden oder zusammenhängenden Schwankungsphasen zu unterscheiden. Wiederholte Wechsel können zu einer zyklischen Materialbeanspruchung führen.
Räumliche Wirksamkeit	Raum- und Nahfeldklima vergleichen. Zu prüfen ist, ob eine Schwankung auch an der empfindlichen Oberfläche beziehungsweise am Ausstattungsobjekt wirksam wird.
Ursachenzusammenhang	Klimaverläufe mit Außenklima, Nutzung, Tür- und Fensterzuständen sowie Anlagenbetrieb korrelieren.
Objekt- und Materialbezug	Materialart, Schichtenaufbau, Abmessungen, Vorschädigungen und historisches Klima in die Bewertung einbeziehen.

Tabelle 11 Kennwerte zur orientierenden Bewertung kurzfristiger Klimaschwankungen

Freiexemplar

9 Literatur

9.1 Zitierte Literatur

[1] WTA-Merkblatt 6-12 Ausgabe: 07.2011/D — Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken; Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International, Referat 6 »Bauphysik«; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

[2] WTA-Merkblatt 10-2 Ausgabe: 05.2019/D — Präventive Konservierung architekturgebundener Glasmalerei; Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International, Referat 10 »Präventive Konservierung«; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

[3] WTA-Merkblatt 10-3 Ausgabe: 10.2022/D — Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte; Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International, Referat 10 »Präventive Konservierung«; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

[4] JCGM 200:2012 — International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3. Auflage, Fassung 2008 mit kleineren Korrekturen; insbesondere Begriffe 2.26, 3.8, 4.14, 4.19 und 4.23; Hrsg.: Joint Committee for Guides in Metrology; https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf

[5] DIN EN 15758:2010-12 — Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren und Geräte zur Messung der Temperatur der Luft und der Oberflächen von Objekten; Deutsche Fassung EN 15758:2010; DIN Media GmbH, Berlin

[6] DIN EN 15757:2010-12 — Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien; Deutsche Fassung EN 15757:2010; DIN Media GmbH, Berlin

[7] DIN EN 16242:2013-03 — Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren und Geräte zur Messung der Luftfeuchte und des Austausches von Feuchtigkeit zwischen Luft und Kulturgut; Deutsche Fassung EN 16242:2012; DIN Media GmbH, Berlin

[8] Rowe, S.; Rozeik, Ch. — The uses of cyclododecane in conservation; Studies in Conservation 53, Supplement 2, S. 17–31, 2008; DOI: 10.1179/sic.2008.53; Supplement-2.17.

[9] DIN EN 15759-2:2018-03 — Erhaltung des kulturellen Erbes – Raumklima – Teil 2: Lüftung für den Schutz von Gebäuden und Sammlungen des kulturellen Erbes; Deutsche Fassung EN 15759-2:2018; DIN Media GmbH, Berlin

[10] WTA-Merkblatt 6-3 Ausgabe: 10.2024/D — Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos; Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International, Referat 6 »Bauphysik«; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

9.2 Weiterführende Literatur

[11] Ankersmit, B.; Stappers, M. H. L. — Managing Indoor Climate Risks in Museums; Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-34241-2

[12] Bujok, S.; Bridarolli, A.; Łukomski, M.; Bratasz, Ł. — Reconsidering Museums' Climate and Seasonal Adjustment for Vulnerable Artifacts. Studies in Conservation 69, Supplement 1, 2024, S. 18–24. DOI: 10.1080/00393630.2024.2375162.

[13] Camuffo, D. — Microclimate for Cultural Heritage: Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments. 3. Auflage, Elsevier, 2019. ISBN 978-0-444-64106-9

Freiexemplar

[14]	Canadian Conservation Institute	Climate Guidelines
[15]	ICOM Schweiz	Empfehlungen für das Raumklimamonitoring in Museen, Fassung vom 12.12.2024; Hrsg.: ICOM Schweiz, Arbeitsgruppe Messstrategie; Abruf: 19.10.2026. https://www.museums.ch/admin/data/files/media/file_de/645/empfehlungen_raumklimamonitoring-in-museen_icom_20241212.pdf
[16]	DIN EN 15759-1:2012-02	Erhaltung des kulturellen Erbes – Raumklima – Teil 1: Leitfäden für die Beheizung von Andachtsstätten; Deutsche Fassung EN 15759-1:2011; DIN Media GmbH, Berlin
[17]	DIN EN 16883:2017-08	Erhaltung des kulturellen Erbes – Leitlinien für die Verbesserung der energiebezogenen Leistung historischer Gebäude; Deutsche Fassung EN 16883:2017; DIN Media GmbH, Berlin
[18]	Thomson, G.	The Museum Environment., in: Butterworth-Heinemann series in conservation and museology, Elsevier Science & Technology Books, 2. Auflage, 1986.
[19]	Getty Conservation Institute	Tools for the Analysis of Collection Environments: Lessons Learned and Future Development. 2022. https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/tools_for_analysis.pdf
[20]	Kilian, R.	Klimastabilität historischer Gebäude – Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung; Fraunhofer Verlag, 2013. ISBN 978-3-8396-0615-5
[21]	Kotterer, M.; Großeschmidt, H.; Boody, F. P.; Kippes, W. (Hrsg.)	Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung, Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. Wien: Schloß Schönbrunn, in Koproduktion mit dem Kunstforum Ostdeutsche Galerie, Regensburg, 2004
[22]	Kramer, R. P.; Schellen, H. L.; van Schijndel, A. W. M	Impact of ASHRAE's museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam. Energy and Buildings 130, S. 286–294, 2016; DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.016
[23]	Martens, M. H. J.	Climate risk assessment in museums: Degradation risks determined from temperature and relative humidity data, Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2012; DOI: 10.6100/ IR729797.
[24]	Taylor, J.; Beltran, V. L. (Hrsg.)	Managing Collection Environments: Technical Notes and Guidance; Getty Conservation Institute, 2023

Freiexemplar

A Anhang A – Beispiele zur Dokumentation der Messpositionen

Die Dokumentation der Messpositionen dient der eindeutigen räumlichen und technischen Zuordnung aller im Klimamonitoring erfassten Messdaten. Sie muss so aufgebaut sein, dass Lage, Funktion und Ausstattung jeder Messstelle während der Messung sowie auch nach Abschluss des Monitorings nachvollzogen werden können. Dies ist insbesondere für die Auswertung, die Bewertung auffälliger Messwerte, die Wartung des Messsystems und die spätere Wiederaufnahme beziehungsweise Fortführung von Messungen erforderlich. Die Dokumentation sollte aus drei sich ergänzenden Bestandteilen bestehen:

- Eintragung der Messpositionen in Grundrisse, Schnitte oder Ansichten,
- tabellarische Erfassung in einer Messstellen- beziehungsweise Sensorliste,
- fotografische Dokumentation der räumlichen Situation und der konkreten Sensoranbringung.

Jeder Messstelle ist eine eindeutige und dauerhaft beizubehaltende Bezeichnung zuzuordnen. Diese Messstellenbezeichnung muss in den Plänen, der Sensorliste, den Bildaufnahmen, den Messdateien und den Auswertungen übereinstimmend verwendet werden. Werden an einer Messstelle mehrere Messgrößen erfasst oder mehrere Sensoren eingesetzt, müssen auch diese eindeutig zugeordnet werden können.

Die Dokumentation ist unmittelbar nach der Installation des Messsystems zu erstellen und bei Änderungen fortzuschreiben. Umsetzungen, Ergänzungen, Sensortausch, Änderungen der Befestigung oder der Messkonfiguration sind mit Datum und gegebenenfalls Begründung zu dokumentieren. Bei empfindlichen historischen Oberflächen sollten auch die Befestigungsart sowie der Zustand vor und nach der Installation beziehungsweise dem Rückbau bildlich festgehalten werden.

Die nachfolgenden Beispiele zeigen Möglichkeiten zur Dokumentation der Messpositionen im Plan, in Form einer Sensorliste und anhand von Bildaufnahmen. Art und Umfang der Dokumentation sind an die Größe des Messnetzes, die Fragestellung sowie die baulichen und konservatorischen Anforderungen des jeweiligen Objekts anzupassen.

A.1 Dokumentation der Messpositionen im Grundriss

Die Messstellen sind in einer geeigneten Planunterlage eindeutig zu verorten. Die im Plan verwendete Messstellenbezeichnung muss der Bezeichnung in der Sensorliste entsprechen. Werden einer Messstelle mehrere Sensoren zugeordnet, genügt im Plan in der Regel ein Messstellensymbol; die einzelnen Sensoren und Messgrößen werden über die Sensorliste zugeordnet. Der Plan sollte mindestens eine Legende, die Orientierung, den Planstand und – soweit relevant – Höhenangaben oder Verweise auf Schnitte und Ansichten enthalten. Ein Beispiel zeigt Bild A1.

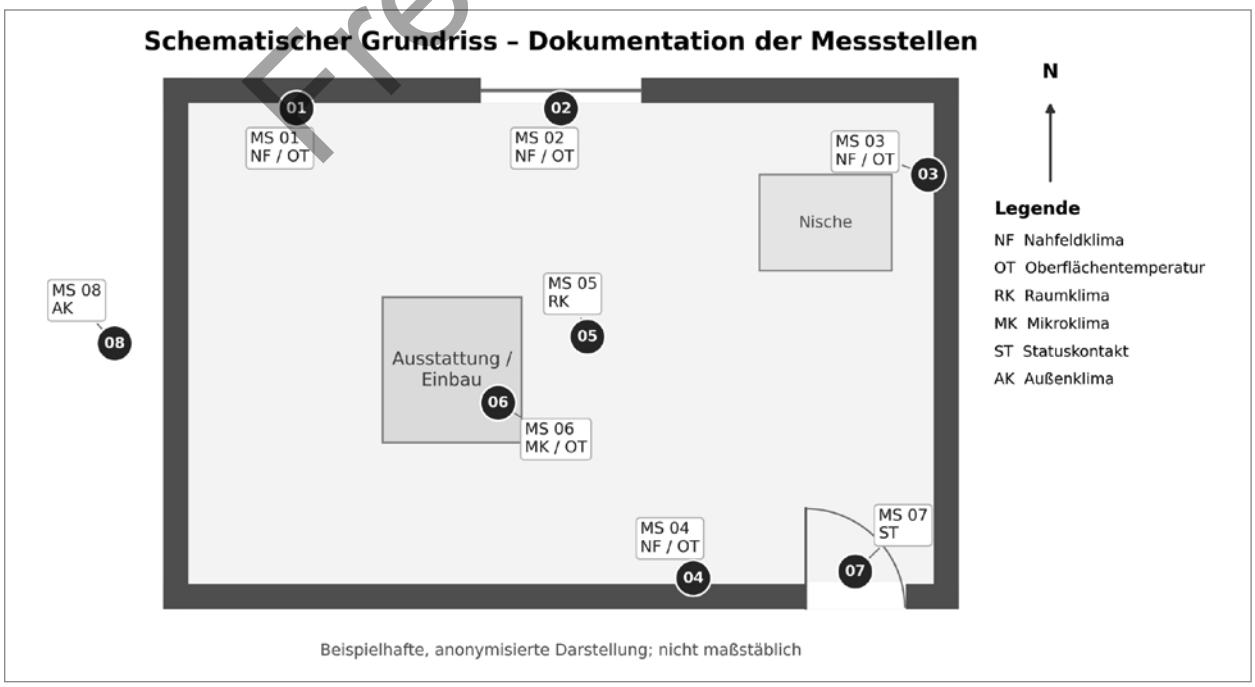


Bild A1 Schematischer Grundriss mit eindeutiger Zuordnung der Messstellen. Die Bezeichnungen MS 01 bis MS 08 entsprechen der nachfolgenden Sensorliste. Darstellung nicht maßstäblich

Freiexemplar

A.2 Messstellen- und Sensorliste

Die Messstellen- und Sensorliste bildet die zentrale Zuordnung zwischen Plan, Sensorik und Messdaten. Sie sollte mindestens Messstelle, Messbereich, Sensor-ID, Sensorart beziehungsweise Messgröße, Lage oder Höhe, Befestigung, Messintervall und besondere Hinweise enthalten. Sensor-IDs müssen eindeutig sein; doppelte Bezeichnungen und Einträge ohne räumliche Zuordnung sind zu vermeiden. Das folgende Beispiel ist bewusst neutral gehalten und enthält keine objektspezifischen Angaben. Die Zuordnung ist in Tabelle A.1 beispielhaft dargestellt.

Messstelle	Messbereich/ Bezug	Sensor-ID	Sensorart/ Messgröße	Lage/Höhe	Hinweis
MS 01	Außenwand Nord, Sockelzone	NF-01	Nahfeldklima: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	0,20 m ü. OKFF; ca. 20 mm vor Oberfläche	Gekoppelt mit OT-01
MS 01	Außenwand Nord, Sockelzone	OT-01	Oberflächentemperatur	0,20 m ü. OKFF	Kontaktfühler; reversible Befestigung
MS 02	Außenwand Nord, obere Wandzone	NF-02	Nahfeldklima: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	2,20 m ü. OKFF; ca. 20 mm vor Oberfläche	Gekoppelt mit OT-02
MS 02	Außenwand Nord, obere Wandzone	OT-02	Oberflächentemperatur	2,20 m ü. OKFF	Kontaktfühler; reversible Befestigung
MS 03	Außenwand Ost, Raumecke	NF-03	Nahfeldklima: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	1,00 m ü. OKFF; ca. 20 mm vor Oberfläche	Gekoppelt mit OT-03
MS 03	Außenwand Ost, Raumecke	OT-03	Oberflächentemperatur	1,00 m ü. OKFF	Kontaktfühler; reversible Befestigung
MS 04	Außenwand Süd, Wandfeld	NF-04 / OT-04	Nahfeldklima und Oberflächentemperatur	0,30 m ü. OKFF	Sensorlage und Abstand fotografisch dokumentieren
MS 05	Raummitte	RK-01	Raumklima: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	1,50 m ü. OKFF; frei umströmt	Abstand zu Wand, Tür und Wärmequelle angeben
MS 06	Rückseite einer Ausstattung / eines Einbaus	MK-01 / OT-05	Mikroklima und Oberflächentemperatur	ca. 50 mm hinter dem Objekt	Befestigung restauratorisch abstimmen
MS 07	Tür/Öffnung	ST-01	Statuskontakt: offen/ geschlossen	am beweglichen Bauteil	Zeitstempel mit Klimadaten synchronisieren
MS 08	Außenbereich, geschützt	AK-01	Außenklima: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	2,00 m ü. Gelände	Wetter- und Strahlungsschutz

Tabelle A.1 Beispielhafte anonymisierte Messstellen- und Sensorliste. Befestigung, Messintervall und weitere Hinweise sind für das konkrete Projekt zu ergänzen. OKFF bezeichnet die Oberkante des fertigen Fußbodens

Freiexemplar

Die Vorlage in Tabelle A.2 ergänzt die Beispieltabelle. Für jede Messstelle ist ein Datensatz anzulegen; Sensorwechsel werden mit Datum und neuer Konfiguration ergänzt.

Dokumentationsfeld	Eintrag für diese Messstelle
Projekt / Bearbeiter / Stand	eintragen
Messstellen-ID / Fragestellung	ID; repräsentativ oder kritisch; Zweck
Ort / Plan / Höhenlage	Gebäude, Raum, Position, Höhe, Planverweis
Fotos / Objektzustand	Übersicht, Detail, Datum, Dateiname, Befund
Sensor / Logger	Typ, Hersteller, Seriennummer, Sensor-ID, Logger-ID
Messgröße / Einheit / Bereich	eintragen
Befestigung / Abstand	Material, Methode, Abstand zur Oberfläche, Freigabe
Messung / Speicherung / Übertragung	jeweils Intervall; Zeitzone; Synchronisation
Kalibrierung / Korrektur	Nachweis, Datum, Punkte, Referenz, Unsicherheit, Korrektur
Installation / Kontrolle / Wechsel	Datum, Verantwortlicher, Anlass, Folgekonfiguration
Rückbau / Abschlusszustand	Datum, Methode, Fotos, Befund, Verantwortlicher

Tabelle A.2 Vorlage für die Messstellen- und Sensordokumentation

A.3 Fotografische Dokumentation der Messpositionen

Für jede Messstelle sollten mindestens eine Übersichts- und eine Detailaufnahme angefertigt werden. Die Übersichtsaufnahme zeigt die Lage im Raum beziehungsweise am Bauteil und ermöglicht die räumliche Zuordnung. Die Detailaufnahme zeigt den Sensor, seine Befestigung, den Abstand zur Oberfläche sowie den Kabelverlauf oder die Position des Datenloggers. Bei empfindlichen historischen Oberflächen sind zusätzlich der Ausgangszustand vor der Installation und der Zustand nach dem Rückbau zu dokumentieren. Bild A2 zeigt eine Übersichtsaufnahme, Bild A3 die zugehörige Detailaufnahme. Bilddateien sind eindeutig zu benennen und der Sensorliste zuzuordnen. Mindestangaben der fotografischen Dokumentation:

- Messstelle und Sensor-ID,
- Raum, Bauteil oder Ausstattungsbezug sowie Blickrichtung,
- Datum der Aufnahme und Bearbeiter,
- Einbauhöhe, Abstand zur Oberfläche und Befestigungsart,
- Änderungen, Umsetzungen und Rückbau mit Datum.

Freiexemplar

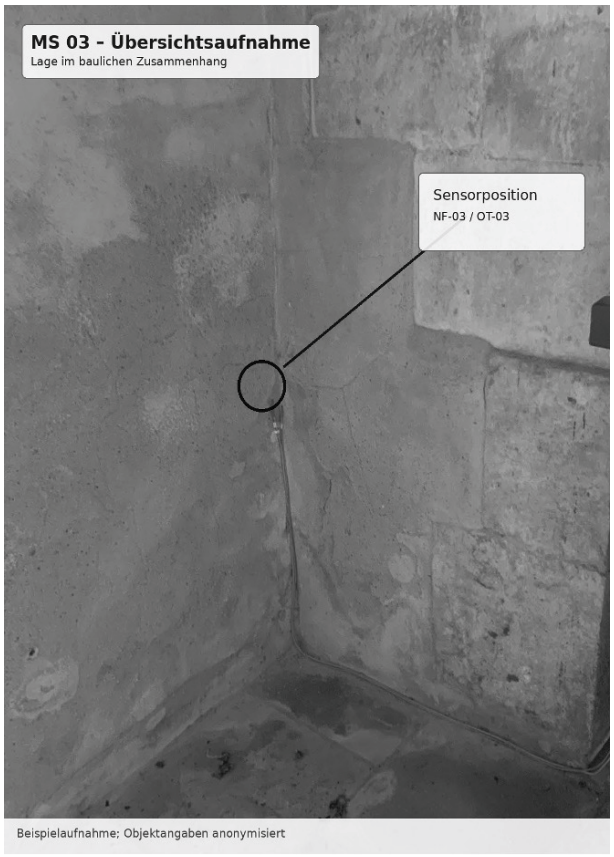


Bild A2 Beispiel einer Übersichtsaufnahme. Die Lage der Messstelle im baulichen Zusammenhang und die Zuordnung zu MS 03 sind erkennbar

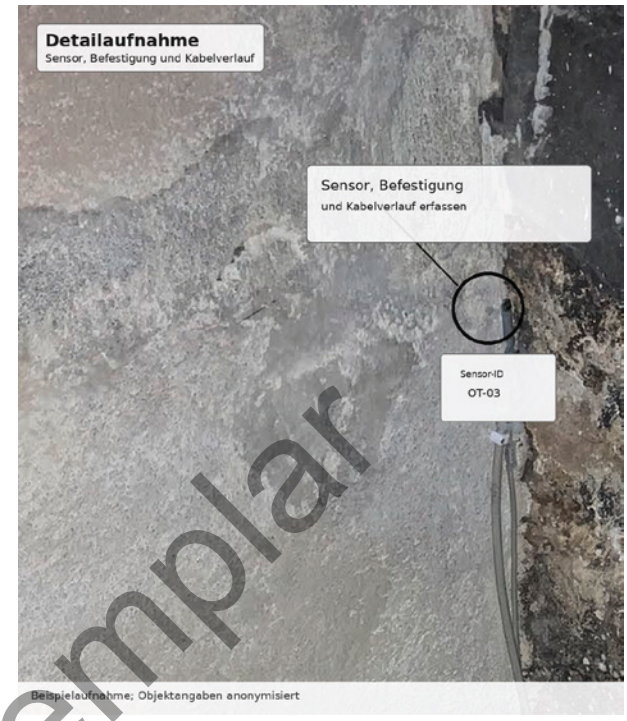


Bild A3 Beispiel einer Detailaufnahme. Sensor, Befestigung, Kabelverlauf und die anonymisierte Sensor-ID sind eindeutig dokumentiert

Freiexemplar

B Anhang B – Beispiele zur Klimadatenauswertung

B.1 Grundsätze der grafischen Darstellung

Grafische Darstellungen unterstützen die Auswertung und Bewertung von Klimadaten. Sie dienen insbesondere dazu, zeitliche Verläufe, räumliche Unterschiede, kurzfristige Ereignisse und mögliche Zusammenhänge mit Witterung, Nutzung oder Anlagenbetrieb sichtbar zu machen. Die Auswahl der Diagrammform richtet sich nach der Fragestellung, dem Messzeitraum, dem Messintervall und dem jeweiligen Bewertungsziel.

Jede Darstellung muss mindestens die Messstellen, Messgrößen und Einheiten, den dargestellten Zeitraum sowie eine eindeutige Legende enthalten. Wurden Messdaten zeitlich zusammengefasst, gefiltert oder anderweitig aufbereitet, ist dies anzugeben. Datenlücken dürfen nicht durch eine scheinbar kontinuierliche Kurve verdeckt werden.

Ziel-, Orientierungs- oder Risikobereiche sind nur darzustellen, wenn sie fachlich begründet und eindeutig gekennzeichnet werden. Ihre Herkunft beziehungsweise objektspezifische Herleitung ist anzugeben. Diagramme ermöglichen eine orientierende Einordnung, ersetzen jedoch nicht die fachliche Interpretation der Messdaten im baulichen, konservatorischen und betrieblichen Zusammenhang.

Werden Messgrößen mit unterschiedlichen Einheiten gemeinsam dargestellt, sind Achsen und Kurven eindeutig zuzuordnen. Bei eingeschränkter Lesbarkeit sind getrennte Diagramme mit gemeinsamer Zeitachse vorzuziehen.

B.2 Typische Diagrammformen

Zeitreihen, Verteilungs- und Wertepaardiagramme zeigen unterschiedliche Aspekte derselben Messdaten: zeitliche Verläufe, statistische Streuungen oder Zusammenhänge zwischen Messgrößen.

Da jede Diagrammform nur bestimmte Aspekte der Messdaten abbildet, ist für eine nachvollziehbare Bewertung häufig die Kombination mehrerer Darstellungen sinnvoll. Anwendungsbereiche sowie wesentliche Hinweise und Grenzen bei der Interpretation sind in Tabelle B.1 zusammengestellt.

Darstellungsform	Geeignet für	Hinweise und Grenzen
Zeitreihendiagramm	Darstellung von Jahres- und Tagesgängen, kurzfristigen Ereignissen sowie Vergleichen zwischen Außen-, Raum-, Nahfeld- und Oberflächenklima	Wichtigste Darstellungsform für Klimadaten. Zeitliche Auflösung und gegebenenfalls Aggregation sind anzugeben. Auffällige Zeiträume können zusätzlich vergrößert dargestellt werden.
Boxplot	Vergleich der statistischen Verteilung mehrerer Messstellen, Räume oder Zeiträume	Zeigt keinen zeitlichen Verlauf. Die Definition der Whisker und die Anzahl der zugrunde liegenden Messwerte sind anzugeben. Auffällige Verteilungen sind ergänzend anhand von Zeitreihen zu prüfen.
Wertepaar- bzw. Streudiagramm	Gemeinsame Darstellung von Temperatur und relativer Luftfeuchte; Vergleich mit Klimakorridoren, Isoplethen oder anderen Bewertungsbereichen	Die zeitliche Reihenfolge der Messwerte ist nicht unmittelbar erkennbar. Die Darstellung sollte daher in der Regel durch eine Zeitreihe ergänzt werden.
Taupunkt- und Kondensationsdiagramm	Vergleich von Taupunkttemperatur und Oberflächentemperatur zur Ermittlung möglicher Kondensationsphasen	Es sind zeitgleich erfasste Nahfeld- und Oberflächendaten zu verwenden. Messunsicherheit sowie angenäherte oder berechnete Oberflächentemperaturen sind kenntlich zu machen.
Differenz- oder Änderungsdiagramm	Darstellung kurzfristiger Änderungen, Änderungsgeschwindigkeiten sowie von Unterschieden zwischen Raum- und Nahfeldklima	Das verwendete Zeitfenster und die Berechnungsmethode sind anzugeben. Die Darstellung sollte zusammen mit den zugrunde liegenden Messwerten interpretiert werden.
Status- und Aktorendiagramm	Zuordnung klimatischer Veränderungen zu Tür- und Fensterzuständen, Nutzung, Heizung, Lüftung, Befeuchtung oder Entfeuchtung	Klima- und Statusdaten müssen auf derselben Zeitachse dargestellt werden. Zustände und Schaltwerte sind eindeutig zu erläutern.

Tabelle B.1 Typische Diagrammformen zur Darstellung und Auswertung von Klimadaten

Die in der vorstehenden Tabelle B.1 aufgeführten Diagrammformen werden nachfolgend anhand ausgewählter Beispielabbildungen veranschaulicht. Die Darstellungen zeigen typische Möglichkeiten zur Aufbereitung und Auswertung von Klimadaten und dienen der methodischen Orientierung. Sie sind nicht als verbindliche Vorgaben für Achsenskalierung, Farbgebung oder Bewertungsbereiche zu verstehen. Für Auswahl, Gestaltung und Interpretation der Beispiele gelten die Grundsätze in Anhang B.1.

Freiexemplar

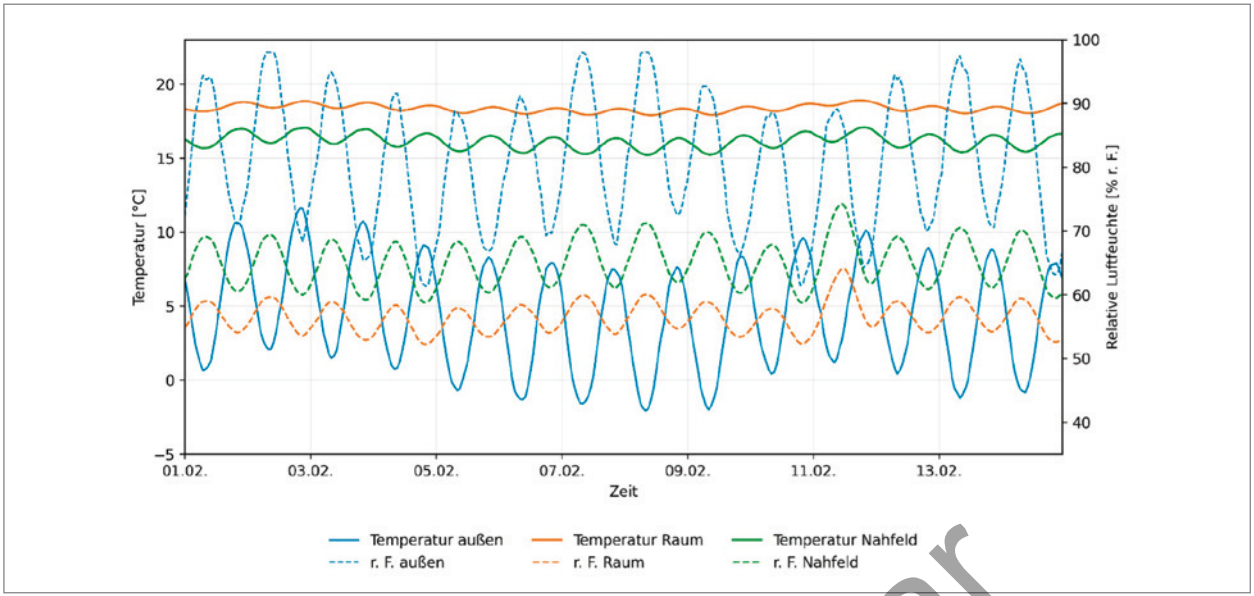


Bild B1 Schematische Zeitreihendarstellung von Außen-, Raum- und Nahfeldklima. Dargestellt sind Lufttemperatur und relative Luftfeuchte über einen Zeitraum von 14 Tagen bei stündlicher Datenauflösung. Die Darstellung veranschaulicht den gedämpften Einfluss des Außenklimas auf das Raumklima sowie abweichende klimatische Bedingungen im Nahfeld. Die verwendeten Werte sind fiktive Beispieldaten und dienen ausschließlich der methodischen Veranschaulichung.

Freiexemplar

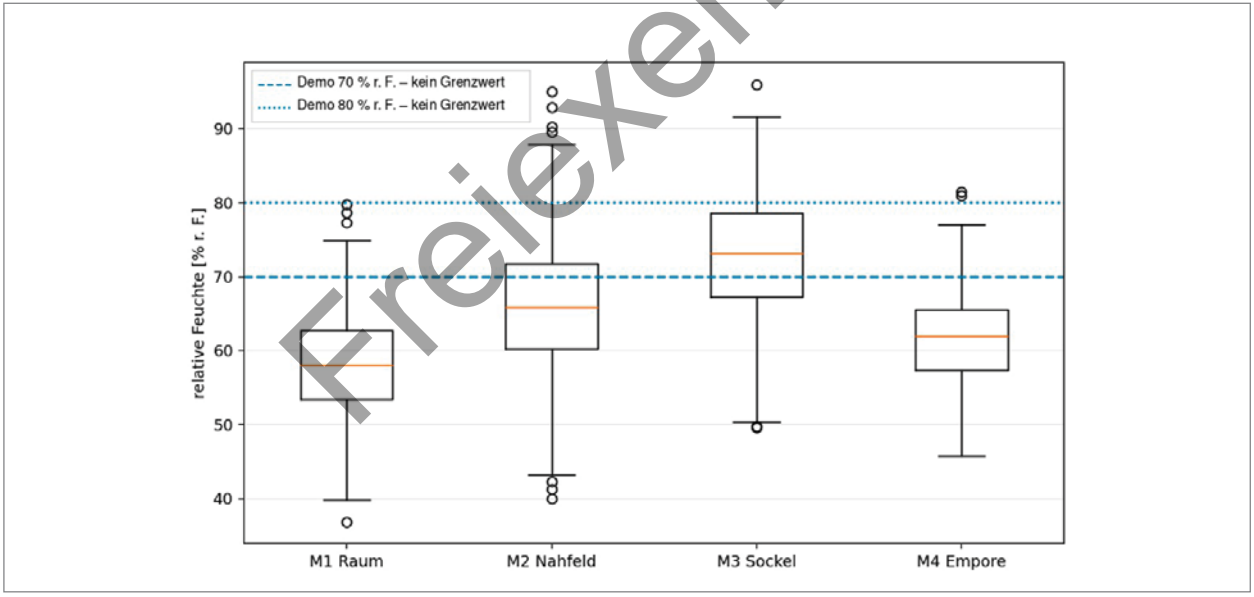


Bild B2 Schematische Verteilung der relativen Luftfeuchte an vier Messstellen. Die Box zeigt den Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil; die Linie kennzeichnet den Median. Die Whisker reichen bis zu den äußersten Messwerten, die höchstens das 1,5-Fache des Interquartilsabstands unterhalb des 25. bzw. oberhalb des 75. Perzentils liegen. Weiter außen liegende Werte sind als Ausreißer dargestellt. Die fiktiven Beispieldaten veranschaulichen Verteilungen. Die Linien bei 70 % und 80 % r. F. sind frei gewählte Demonstrationslinien und keine fachlich hergeleiteten Grenzwerte.

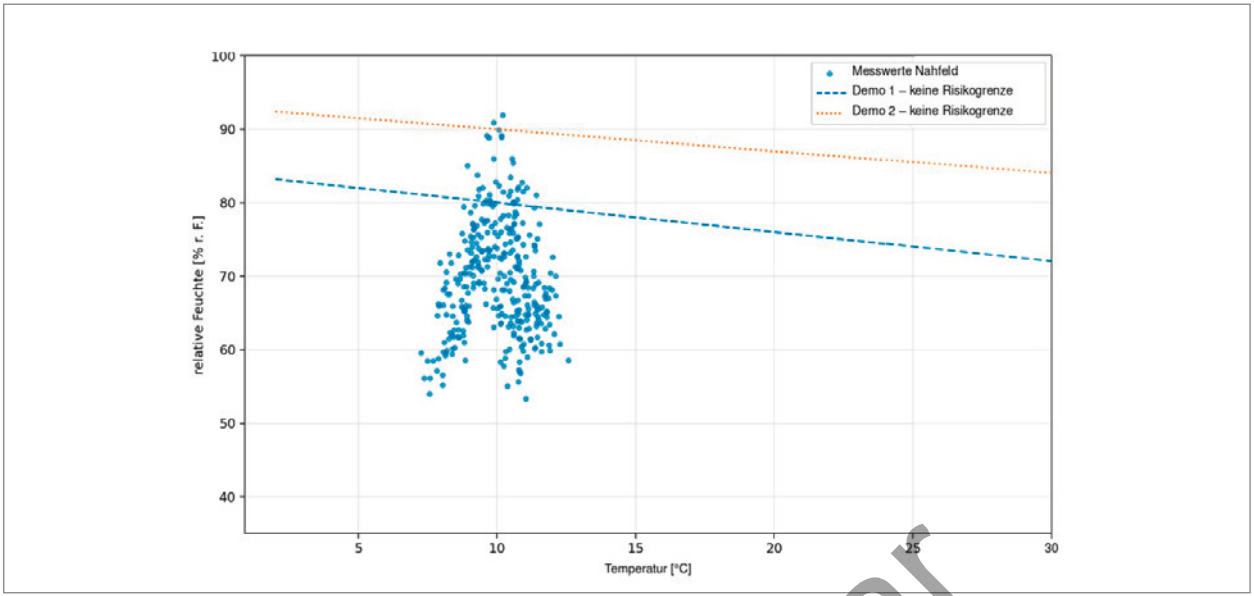


Bild B3 Schematische Wertepaare aus Nahfeldlufttemperatur und relativer Nahfeldluftfeuchte; die Temperaturachse reicht bis 30 °C. Die eingezeichneten Linien sind frei gewählte Demonstrationslinien ohne Risikoklassifikation. Die Darstellung zeigt Nahfeldbedingungen und erlaubt allein keine Bewertung des Schimmelrisikos an einer Oberfläche. Dafür sind die zugehörige Oberflächentemperatur, begründet ermittelte Oberflächenfeuchte, zeitliche Verläufe und ein geeignetes Bewertungsverfahren erforderlich.

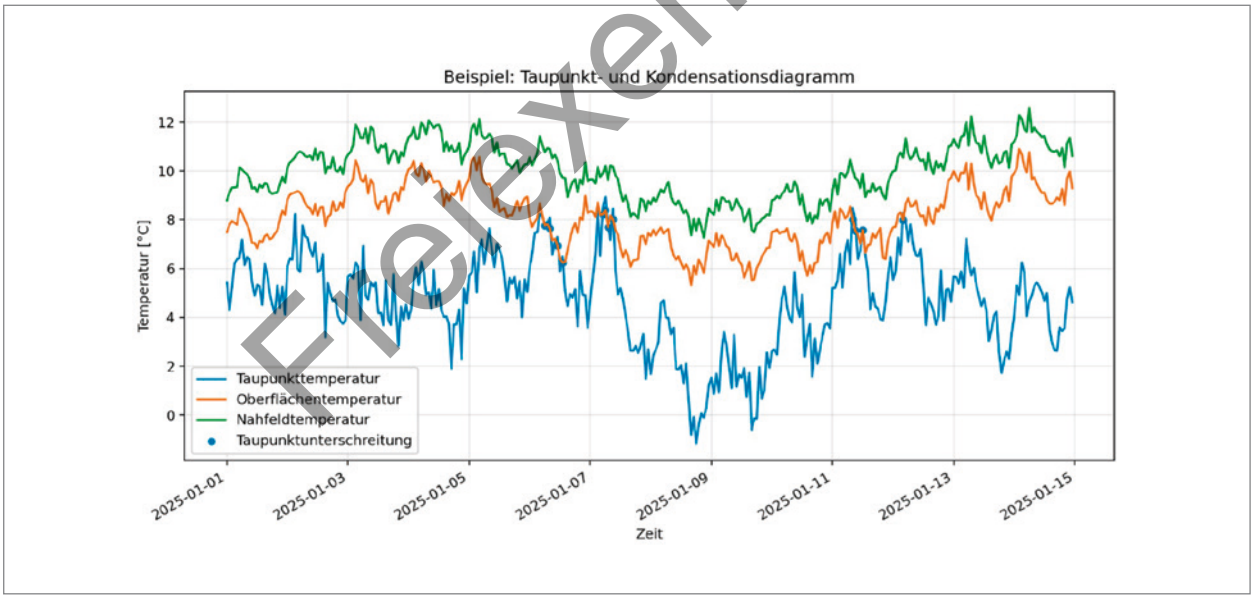


Bild B4 Beispielhafte Zeitreihendarstellung der Taupunkttemperatur, der Oberflächentemperatur und der Nahfeldtemperatur. Markiert sind Zeitpunkte, an denen die Oberflächentemperatur den Taupunkt erreicht oder unterschreitet. Die Herkunft der Oberflächentemperatur – gemessen, angenähert oder berechnet – ist bei einer tatsächlichen Auswertung eindeutig anzugeben. Messunsicherheit und zeitliche Auflösung sind zu berücksichtigen.

Fileexemplar

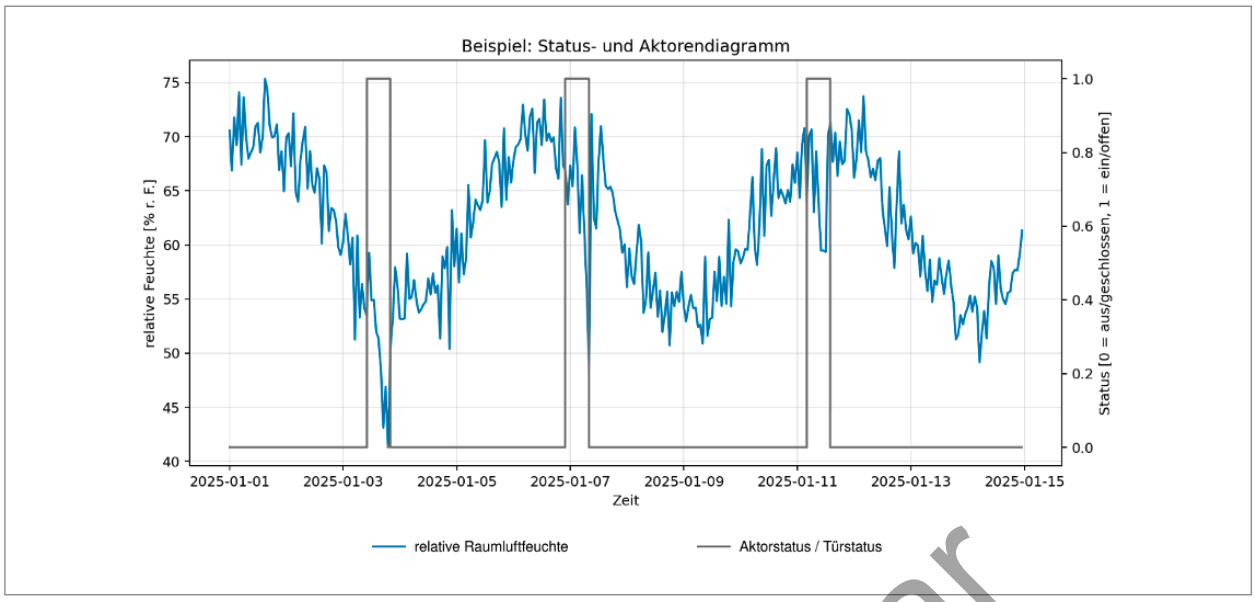


Bild B5 Gemeinsame Zeitreihendarstellung der relativen Raumluftfeuchte und des Aktorstatus. 0 kennzeichnet aus/geschlossen, 1 ein/offen. Die gemeinsame Zeitachse ermöglicht die Zuordnung zu Schalt-, Betriebs- oder Nutzungsereignissen. Zeitliches Zusammentreffen ist allein kein Nachweis von Ursache und Wirkung; Außenklima, Nutzung und weitere Betriebszustände sind gemeinsam zu prüfen.

Freiexemplar