Mauerwerkseigenschaften – Untersuchen und Bewerten

Merkblatt E-7-3
Ausgabe: 10.2026/D
Einspruchsfrist: 30.04.2027

Masonry Properties – Investigation and Assessment

Propriétés de la maçonnerie – Investigation et évaluation

Deskriptoren

Mauerwerksdiagnostik, Bestandsuntersuchung, Zustandsbewertung, Probenahme, mechanische Kennwerte, feuchtetechnische Kennwerte, hygrothermische Kennwerte, Salzbelastung, Mörtel, Natursteinmauerwerk

Key Words

Masonry diagnostics, condition survey, condition assessment, sampling, mechanical properties, moisture-related properties, hygrothermal properties, salt contamination, mortar, natural stone masonry

Mots-Clés

Diagnostic des maçonneries, étude de l'état existant, évaluation de l'état, prélèvement d'échantillons, caractéristiques mécaniques, caractéristiques d'humidité, caractéristiques hygrothermiques, contamination saline, mortier, maçonnerie en pierre naturelle

Erläuterungen zum Merkblatt

Das Merkblatt ersetzt das bisherige Merkblatt 4-5 Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik.

Ergänzend sind folgende WTA-Merkblätter in der jeweils aktuellen deutschen Fassung zu beachten:

2-9	Sanierputzsysteme
2-11	Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Außenfassaden
3-9	Natursteinrestaurierung nach WTA XI: Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen
3-10	Natursteinrestaurierung nach WTA XII: Zustands- und Materialkataster für Natursteinbauwerke
3-20	Instandsetzung von historischem Ziegelmauerwerk
4-11	Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen
6-2	Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse
7-1	Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit
7-4	Ermittlung der Druckfestigkeit von Bestandsmauerwerk aus künstlichen kleinformatigen Steinen

Inhalt

		Seite
	Abkürzungsverzeichnis	4
1	Zielsetzung und Anwendungsbereich	4
2	Grundlegendes	5
3	Mauerwerksaufbau und -zustand	6
4	Mechanische Kennwerte	8
5	Kennwerte für hygrothermische Nachweise	11
6	Feuchtetechnische Kennwerte	13
7	Chemisch-mineralogische Stein- und Mörtelkennwerte	16
8	Literatur	20
A	Anlage A	24

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

Mauerwerkseigenschaften – Untersuchen und Bewerten

Deutsche Fassung vom Oktober 2026

Referat 7 Tragverhalten und Schadensdiagnostik

Leiter des Referates

Heinrich Wigger

Leiter der Arbeitsgruppe

Jonny Henkel, Claudia Neuwald-Burg

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Toralf Burkert
Christian Dialer
Axel Dominik
Nancy Freitag
Jonny Henkel
Ulrike Henes-Klaiber
Claudia Neuwald-Burg
Gabriele Patitz
Andreas Protz
Horst Schuh
Heiko Twelmeier
Heinrich Wigger
Lars Witte

Erarbeitung des Merkblattes

Beginn der Arbeiten:	Februar 2022
Ende der Arbeiten:	Oktober 2026
Merkblattentwurf:	Oktober 2026
Endgültige Fassung:	–

ISBN (E-Book) 978-3-7388-1120-9

Freiexemplar

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 9 70-25 00, Telefax +49 7 11 9 70-25 99, E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de, http://www.baufachinformation.de

Kurzfassung

Das Merkblatt bietet praxisorientierte Empfehlungen zur Untersuchung von Mauerwerkseigenschaften. Die dargestellten Vorgehensweisen und Verfahren bilden die Grundlage für eine Bewertung von Bestandsmauerwerk sowie für die Planung von Konservierungs- und Instandsetzungsmaßnahmen. Behandelt werden Untersuchungen zum Mauerwerksaufbau und -zustand, zu mechanischen und feuchtetechnischen Kennwerten, Kennwerten für hygrothermische Nachweise sowie chemisch-mineralogischen Stein- und Mörtelkennwerten. Es werden Hinweise zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse gegeben oder auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Das Merkblatt bündelt die für die Mauerwerksdiagnostik relevanten Fragestellungen und stellt die Verbindung zu den einschlägigen WTA-Merkblättern und weiteren Regelwerken her. Es dient damit als Orientierung an den fachlichen Schnittstellen zwischen Bauwerksuntersuchung, Schadensdiagnostik, Planung und Instandsetzung.

Deskriptoren: Mauerwerksdiagnostik, Bestandsuntersuchung, Zustandsbewertung, Probenahme, Druckfestigkeit, Mauerwerksaufbau, Feuchtemessung, Durchfeuchtungsgrad, Hygrothermische Kennwerte

Salzbelastung, Natursteinmauerwerk

Abstract

This guideline provides practical recommendations for investigating the properties of masonry. The procedures and methods described form the basis for assessing existing masonry and for planning conservation and repair measures. The guide covers investigations into the structure and condition of masonry, mechanical and moisture-related parameters, parameters for hygrothermal analysis, and chemical and mineralogical parameters of bricks and mortar. Guidance is provided on the evaluation of investigation results, or reference is made to relevant specialist literature. The guideline brings together the issues relevant to masonry diagnostics and establishes links to the relevant WTA guidelines and other regulatory frame-works. It thus serves as a guide at the technical interfaces between building inspection, damage diagnostics, planning and repair.

Key Words: Masonry diagnostics, condition survey, condition assessment, sampling, mechanical properties, moisture-related properties, hygrothermal properties, salt contamination, mortar, natural stone masonry

Résumé

Cette fiche technique fournit des recommandations pratiques pour l'étude des caractéristiques de la maçonnerie. Les procédures et méthodes présentées constituent la base d'une évaluation de la maçonnerie existante ainsi que de la planification des mesures de conservation et de remise en état. Sont abordées les analyses relatives à la structure et à l'état de la maçonnerie, aux paramètres mécaniques et hydriques, aux paramètres nécessaires aux vérifications hygrothermiques, ainsi qu'aux paramètres chimico-minéralogiques des pierres et du mortier. Des indications sont fournies pour l'évaluation des résultats d'analyse ou des renvois sont faits vers la littérature spécialisée correspondante. La fiche technique rassemble les questions pertinentes pour le diagnostic des maçonneries et établit le lien avec les fiches techniques WTA correspondantes ainsi qu'avec d'autres référentiels. Elle sert ainsi de guide aux interfaces techniques entre l'étude des ouvrages, le diagnostic des dommages, la planification et la remise en état.

Mots-clés: Diagnostic des maçonneries, étude de l'état existant, évaluation de l'état, prélèvement d'échantillons, caractéristiques mécaniques, caractéristiques d'humidité, caractéristiques hygrothermiques, contamination saline, mortier, maçonnerie en pierre naturelle

Freiexemplar

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
c	Konzentration (z. B. Salzgehalt)	mg/kg, %
c_0	Kohäsion (Haftscherfestigkeit)	MPa
d	Dicke	mm, cm
DFG	Durchfeuchtungsgrad	%
DFG_{hygr}	hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad	%
E_m	Elastizitätsmodul des Mörtels	MPa, N/mm^2
E_{ma}	Elastizitätsmodul des Mauerwerks	MPa, N/mm^2
E_{st}	Elastizitätsmodul der Steine	MPa, N/mm^2
f_{st}	Druckfestigkeit von Mauersteinen	MPa, N/mm^2
f_{bk}	Charakteristische Druckfestigkeit von Natursteinen	MPa, N/mm^2
f_k	charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit	MPa, N/mm^2
f_{ma}	Mauerwerksdruckfestigkeit	MPa, N/mm^2
f_t	Zugfestigkeit	MPa, N/mm^2
f_v	Schubfestigkeit	MPa, N/mm^2
K_e	Proportionalitätsfaktor zur Abschätzung des Elastizitätsmoduls	–
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
m	Masse	g, kg
μ	Reibungsbeiwert	–
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Leitfähigkeit	S/m
t	Zeit	s, min, h
T	Temperatur	°C, °K
u	Feuchte- bzw. Wassergehalt	M.-%
$u_{rel.\ Luftfeuchte}$	hygroskopischer Feuchtegehalt	M.-%
u_f	freier Wassergehalt	M.-%
u_{max}	Sättigungsfeuchte	M.-%
V	Volumen	m^3, ℓ
V_m	Volumenanteil des Mörtels	–
V_{st}	Volumenanteil der Steine	–

Freiexemplar

1 Zielsetzung und Anwendungsbereich

Dieses Merkblatt bietet praxisorientierte Empfehlungen für die Planung und Durchführung technisch-naturwissenschaftlicher Untersuchungen von Mauerwerk im Bestand im Rahmen der

- Grundlagenermittlung für Tragfähigkeitsnachweise,
- Planung und Vorbereitung von Konservierungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen sowie
- Nachuntersuchung zur Kontrolle und Qualitätssicherung dieser Maßnahmen.

Der Anwendungsbereich des Merkblatts umfasst Bauteile aus Mauerwerk wie Fundamente, Wände und Stützwände, Säulen, Pfeiler, Wandvorlagen, Stürze, Bögen, Decken, Gewölbe und Kuppeln.

Behandelt werden der Mauerwerksaufbau und der Erhaltungszustand sowie mechanische, physikalische, chemische und mineralogische Eigenschaften des Verbundsystems Mauerstein-Mauermörtel-(Deckschichten); ergänzend wird die Feuchte- und Salzthematik dargestellt.

Das Merkblatt richtet sich an Bauherrschaften und Verfügungsberechtigte, koordinierende Personen und Fachplanende, fachkundige Untersuchende sowie Prüfinstitute und Fachlabore. Es ist so aufgebaut, dass allgemein verständliche Erläuterungen und fachlich vertiefende Hinweise themenbezogen behandelt werden. Bauherrschaften und Projektverantwortliche mit geringen Vorkenntnissen sollen nachvollziehen können, warum Untersuchungen erforderlich sind, welchen Zweck sie erfüllen und wie sie grundsätzlich ablaufen. Fachkundige Untersuchende, Prüfinstitute und Fachlabore erhalten vertiefte Hinweise zur Auswahl und fachgerechten Durchführung der Verfahren.

Aufgrund der materiellen und konstruktiven Vielfalt historischer Mauerwerke lassen sich für die meisten Untersuchungen weder pauschale Abläufe noch allgemeingültige quantitative Grenzwerte angeben. Art und Umfang der Untersuchungen richten sich nach der Aufgabenstellung, der Bauweise, dem Erhaltungszustand, dem Denkmalwert, der zulässigen Eingriffstiefe und dem angestrebten Aussageziel. Anlage A im Anhang bietet eine erste Orientierung, welche Untersuchungen typischerweise eingesetzt werden und welche nur bei besonderen Fragestellungen erforderlich sind. Diese Übersicht soll Bauherrschaften und Projektverantwortliche mit geringen Vorkenntnissen in der Mauerwerksdiagnostik bei der Untersuchungsplanung unterstützen. Die Auswahl und Festlegung geeigneter Verfahren ist durch fachkundige Personen vorzunehmen und richtet sich nach dem Einzelfall.

2 Grundlegendes

2.1 Verantwortlichkeiten

Die Verantwortung für ein Bauwerk tragen die Bauherrschaft oder die verfügungsberechtigte Person. Sie müssen die Einhaltung aller baurechtlichen Vorgaben und erforderlichen Genehmigungen sicherstellen (z. B. denkmalschutzrechtliche Genehmigungen oder arbeitsschutzrechtliche Bestimmungen). Bei komplexen Aufgaben sollte die Bauherrschaft eine Person bestimmen, die den Informationsfluss zwischen den Projektbeteiligten, Behörden und Prüfeinrichtungen koordiniert und die Abläufe der erforderlichen Untersuchungen abstimmt.

2.2 Untersuchungskonzept und Arbeitsschritte

Art und Umfang der Mauerwerksuntersuchungen sind entsprechend den Erfordernissen der Aufgabenstellung – bauliche Situation, geplante Nutzung, mutmaßliche Konservierungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen sowie Denkmalwert – festzulegen (siehe auch WTA-Merkblatt 7-1 [9]).

Das Untersuchungskonzept umfasst in der Regel die im Ablaufschema in Bild 1 aufgelisteten Arbeitsschritte.

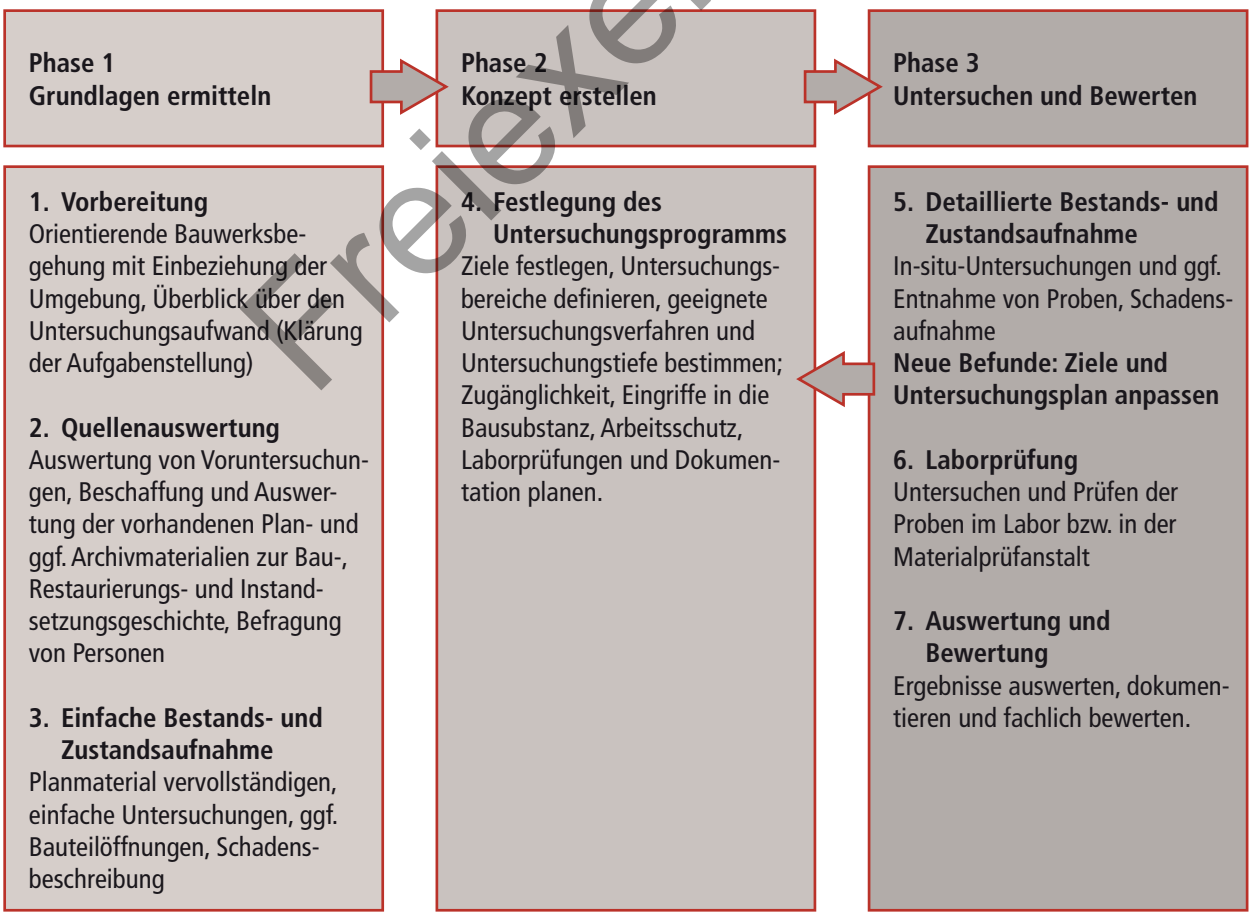


Bild 1 Ablaufschema für Mauerwerksuntersuchungen

Freiexemplar

2.3 Probenahme

2.3.1 Allgemeine Anforderungen

Bei der Auswahl der Probenahmestellen sind sämtliche zu beurteilenden Bauteile, Baustoffe und Schadensformen abzudecken. Anzahl bzw. Menge und Art der Proben werden im Untersuchungsplan festgelegt. Häufig werden Mauersteine und Mauermörtel separat beprobt. Die Proben müssen eine ausreichende Größe und Anzahl aufweisen. Bei einer zu geringen Anzahl oder zu kleinen Proben wird die Inhomogenität im Mauerwerkskörper nicht ausreichend erfasst. Die Entnahme sollte von fachkundigen Personen möglichst zerstörungsarm durchgeführt werden.

Ort, Zeitpunkt und Verfahren der Entnahme sowie die herrschenden klimatischen Bedingungen sind zu dokumentieren, ebenso die genaue Lage und Orientierung der Entnahmestellen im Bauteil (Koordinaten mit Höhen- und Tiefenangaben).

Entnahme, Verpackung, Transport und Lagerung der Proben dürfen die im Mauerwerk vorhandenen Stoffkennwerte (z. B. Materialfeuchte) nicht verändern. Untersuchungs- und Probenahmestellen sind fachgerecht zu verschließen.

2.3.2 Besonderheiten bei Baudenkmälern

Probenahmen an Baudenkmälern sind genehmigungspflichtig (z. B. Bayerisches Denkmalschutzgesetz Art. 6). Die Anforderungen der DIN EN 16085 [33] sind einzuhalten.

2.4 Dokumentation

Alle Probenahmen und Untersuchungsergebnisse sind zu dokumentieren und mit den Bauwerksakten zu archivieren. Die Mindestdokumentation umfasst in der Regel den Prüfbericht, die Dokumentation aller entnommenen Proben sowie je ein Foto der Entnahmestellen vor der Probenahme, nach der Probenahme und nach der Wiederherstellung.

3 Mauerwerksaufbau und -zustand

3.1 Bauteilgeometrie

Die Abmessungen der Bauteile sind aufzunehmen. Dabei sind auch Durchbiegungen, Außermittigkeiten, Schrägstellungen und Ausbeulungen zu erfassen. Zusätzlich sind Instandsetzungen, Ergänzungen, Querschnittschwächungen, Schlitze, Baufugen, Dehnfugen, Risse und Versätze zu dokumentieren. Erforderlichenfalls ist ein verformungsgerechtes Aufmaß zu erstellen.

Die Messtechnik ist an die örtlichen Gegebenheiten und die erforderliche Genauigkeit anzupassen. Mögliche Messinstrumente reichen von analogen Werkzeugen, wie Gliedermaßstab, Bandmaß, Wasserwaage, bis zu digitalen Systemen, wie elektrooptische Entfernungsmesser, Tachymeter, 3D-Laserscanner, Lidar, Fotogrammetrie (stativ- oder drohnenbasiert). Für nicht einsehbare Bereiche werden geeignete Sonderverfahren eingesetzt, z. B. Bauteilöffnungen, Sondierungsbohrungen, Endoskopie, Schürfe, Thermografie oder Bauradar.

3.2 Oberflächen

Die Erfassung von Mauerwerksoberflächen erfolgt in der Regel zusammen mit der Zustandserkundung. Dabei werden alle wesentlichen Materialien, Bearbeitungsmerkmale und sichtbare Schäden dokumentiert. Die Untersuchung erfolgt zerstörungsfrei – überwiegend durch Sichtprüfung, Fotografie oder mit weiteren optischen Hilfsmitteln (z. B. Risslupe). Die Befunde werden zweckmäßigerweise kartiert. Die Verfahren sind in den WTA-Merkblättern 3-9 [3], 3-10 [4] und 3-20 [6] beschrieben.

Historisch bedeutsame Oberflächen sind von qualifizierten Fachkräften aufzunehmen und zu bewerten.

Freiexemplar

3.3 Mauerwerksaufbau

Zur Beschreibung des Mauerwerksaufbaus werden sowohl die Baustoffe (Steinarten und -formate, Mörtel, Putze sowie weitere Materialien wie Bekleidungen, Dämmstoffe, Abdichtungen, Bewehrungen, Anker, Reparatur- und Injektionsmörtel) als auch die Mauerkonstruktion erfasst. Wesentliche konstruktive Merkmale sind:

- der Mauerwerksverband,
- Anzahl und Dicke der Schalen,
- Art und Verbindung der Schalen (unverzahnt, verzahnt mit Bindersteinen, verankert),
- Luftschichten und Hohlräume sowie
- Metallteile wie Dübel und Anker.

Zur Ermittlung dieser Parameter sind meist punktuelle Bauteilöffnungen (z. B. Bohrungen) notwendig. Ergänzend können zerstörungsarme Verfahren wie Endoskopie, Thermografie und Bauradar (siehe Patitz [48]) eingesetzt werden, um Eingriffe in die Bausubstanz zu minimieren.

3.4 Mauerwerksverbände

Bei der Ermittlung des Mauerwerksverbandes ist zunächst zwischen Mauerwerk aus künstlichen Steinen und Natursteinmauerwerk zu unterscheiden. Mauerwerk aus künstlichen Steinen wird anhand von Steinformat, Fugenausbildung (z. B. vollflächig oder Randstreifenvermörtelung), Fugendicke und Überbindemaß beschrieben. Natursteinmauerwerk wird gemäß DIN EN 1996-1-1/NA, Anhang NA.L [27] nach Steinformaten, Bearbeitungsgrad der Steine, Fugendicken und -neigungen, Verfüllungsgrad der Fugen sowie dem Übertragungsfaktor klassifiziert.

Bezeichnungen und Kennzeichen historischer Mauerwerksverbände werden z. B. in Ahnert/Krause [40] beschrieben.

3.5 Zustandserfassung

Bei der bautechnischen Zustandserfassung werden alle Merkmale erfasst, die die Tragfähigkeit oder die Dauerhaftigkeit eines Bauteils beeinflussen können. Untersucht werden dabei die Oberflächen, der Querschnitt und das Gefüge. Die wichtigsten Untersuchungsziele und -verfahren sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für Natursteinmauerwerksoberflächen wird auf die WTA-Merkblätter 3-9 [3] und 3-10 [4], für Ziegelmauerwerk auf WTA-Merkblatt 3-20 [6] verwiesen.

Zur Feststellung des Mauerwerkszustands stehen zerstörungsfreie, zerstörungsarme und zerstörende Methoden zur Verfügung. In der Regel kommen zunächst einfache Verfahren zum Einsatz, die bei Bedarf um technisch und finanziell aufwendigere Untersuchungen ergänzt werden (vgl. Anlage A).

Die grundlegende Untersuchungsmethode für Oberflächen und Risse ist die Sichtprüfung. Weitere Basisverfahren sind die Tastuntersuchung, das Abklopfen und das Ansprühen mit Wasser (vgl. Abschnitt 7.1.2). Zur Tiefenuntersuchung kann minimalinvasiv die Endoskopie eingesetzt werden. Zur genaueren Erfassung des Zustands im Mauerwerksquerschnitt werden an gezielten Stellen Erkundungsbohrungen oder Bauteilöffnungen vorgenommen. Ergänzend bzw. alternativ können zerstörungsarme Untersuchungsverfahren eingesetzt werden, wie Bauradar (für flächige Scans zur Bewertung von Schalenablösungen oder Gefügestörungen), Thermografie (zur Lokalisierung von Durchfeuchtungen und Konstruktionselementen) oder Ultraschall (zur Identifikation von Rissen). Die Methoden können kombiniert werden, um ein möglichst umfassendes Bild des Querschnittszustands zu erhalten.

Freiexemplar

Untersuchungsziele	Material	Zu erfassende Merkmale	Mögliche Verfahren
Oberflächen-beschaffenheit	Stein	• Bearbeitungsmerk-male • Absanden, Abmehlen • Bewuchs • Feuchte • Flecken • Gefügestörungen • Hydrophobierungen • Krusten • Risse • Schalenbildung, Hohlstellen	• Sichtprüfung, softwareunterstützte Auswertungen von Fotografien, • Tastuntersuchung (z. B. Prüfung auf Abmehlen, Absanden) • Abklopfen (evtl. mit Mikrofon), • Klangprüfung, • Kratz- bzw. Ritzprüfung, • einfache Benetzungsversuche (Ansprühen), • Ultraschall
	Mörtel	• Ausblühungen • Bindemittelverlust • Flankenhaftung • Risse	• Sichtprüfung • Tastuntersuchung • Kratz-, Ritz-, Eindringprüfung
	Mauerwerk	Saugverhalten	siehe 5.7
Zustand von Quer-schnitt/Struktur	Mauerwerk	Risse: Verlauf, Länge, Breite, Tiefe, Versatz der Riss-ufer in der Ebene und senkrecht dazu, Alter, zeitliche Entwicklung	Rissbreitenschablone, Risslupe, Riss-aufnehmer, Bohrkern, Vergleich mit vorhandener Baudokumentation
		Schalenablösungen: Größe des abgelösten Bereichs	Sondierungsbohrungen, Endoskopie, Bauteilöffnung, Bauradar

Tabelle 1 Untersuchungsziele und -verfahren zur Zustandserkundung

Freiexemplar

4 Mechanische Kennwerte

4.1 Wesentliche Kenngrößen und Einflussfaktoren

Physikalische und mechanische Mauerwerkseigenschaften werden untersucht, wenn eine statische Bewertung des Bauwerkszustandes erforderlich ist, beispielsweise bei Instandsetzungen, Umbauten, Umnutzungen oder Nachrechnungen. Wesentliche Kennwerte sind die Rohdichte, die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul.

Die Bewertung dieser Kennwerte muss im Kontext des Mauerwerksaufbaus, der tatsächlichen Beanspruchung im Einbauzustand und des Feuchtezustands erfolgen. Starke Streuungen von Prüfergebnissen sind vor dem Hintergrund der Gefügebeschaffenheit zu interpretieren. Insbesondere ist bei der Ableitung charakteristischer Werte für rechnerische Nachweise zu prüfen, ob lokale Schwachstellen (z. B. Fehlstellen, Risse oder starke Durchfeuchtung) für das Tragverhalten maßgebend sind.

4.2 Anisotropie

Mauerwerk weist aufgrund seiner Konstruktion ein richtungsabhängiges Materialverhalten auf (Anisotropie). Auch die mechanischen Eigenschaften der Mauersteine sind richtungsabhängig. Anisotropie entsteht bei Natursteinen aufgrund ihrer geologischen Entstehung, bei Ziegeln durch die Formgebung (Streichen oder Strangpressen) und bei Porenbetonsteinen durch die Treibrichtung im Herstellungsprozess. Bei der Materialprüfung sind deshalb stets die ursprüngliche Einbaulage und die Kraftrichtung im Bauteil zu beachten.

4.3 Rohdichte

Die Mauerwerksrohdichte dient der Ermittlung des Eigengewichts eines Bauteils und ist zudem ein maßgeblicher Kennwert für Wärme- und Schallschutznachweise (vgl. Abschnitt 5). Sie wird entweder direkt an Mauerwerksprüfkörpern bestimmt oder indirekt aus den volumenbezogenen Anteilen von Steinen und Mörtel sowie deren Rohdichten berechnet. Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt für künstliche Steine in Anlehnung an DIN EN 772-13 [21], für Natursteine nach DIN EN 1936 [26] und für Mörtel ebenfalls in Anlehnung an die Steinprüfung, bei unregelmäßigen Probekörpern mit Hilfe der hydrostatischen Wägung. Die Anzahl der Proben richtet sich nach der Anzahl der Mauerwerkskomponenten. Je Mauerwerkskomponente sollten mindestens fünf Proben untersucht werden (siehe auch Hinweise in 2.3).

4.4 Festigkeitskennwerte

4.4.1 Druckfestigkeit

Mauerwerk aus kleinformatigen künstlichen Steinen

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk aus künstlichen kleinformatigen Steinen (Ziegel, Kalksandsteine, Leichtbetonsteine) bis zur Größe 2DF (Zweifach-Dünnformat, 240 × 115 × 113 mm) bzw. Klosterformat (ca. 300 × 150 × 100 mm) wird nach WTA-Merkblatt 7-4 [10] bestimmt, Hinweise dazu enthält Wigger (Hrsg.) [52].

Mauerwerk aus großformatigen künstlichen Steinen

Bei Mauerwerk aus künstlichen großformatigen Steinen (Hohlblocksteine, großformatige Mauerziegel, Kalksandsteine, Porenbetonsteine) erfolgt die Prüfung stets komponentenbezogen; Stein und Mörtel werden getrennt untersucht. Die Steine sind als ganze Steine zu entnehmen und in Anlehnung an die für die jeweilige Steinart geltende Norm zu prüfen. Eine Druckfestigkeitsprüfung von Teilstücken ist in der Regel nicht möglich. Die Anzahl der Proben richtet sich nach der Anzahl der Mauerwerkskomponenten. Je Mauerwerkskomponente sollten mindestens fünf Proben untersucht werden (siehe auch Hinweise in 2.3).

Eine Ausnahme bilden Steintypen, die zum Zeitpunkt ihrer Herstellung bereits genormt und qualitätsüberwacht waren. Hier kann die Druckfestigkeit u. U. aus der Rohdichte abgeleitet werden. Die Rohdichte lässt sich bei bekannter Steingeometrie auch aus der Scherbenrohdichte berechnen, sodass unter diesen Randbedingungen eine Entnahme von Teilstücken der Steine ausreichend sein kann. Diese Vorgehensweise setzt Kenntnisse über historische, regionaltypische Steinarten und deren Normung voraus.

Das weitere Vorgehen erfolgt in sinngemäßer Anwendung von WTA-Merkblatt 7-4 [10].

Natursteinmauerwerk

Natursteinmauerwerk wird in Anlehnung an DIN EN 1996-1-1/NA, Anhang NA.L [27], mithilfe der Güteklassen N1 bis N4 bewertet. Dazu werden Steinform, Bearbeitungstiefe der Lager- und Stoßflächen, Fugenbreiten, Überbindemaß, Neigung der Lagerfugen sowie der Übertragungsfaktor (Verhältnis überlappender Steinflächen zum Wandquerschnitt) aufgenommen.

Im zweiten Schritt wird die charakteristische Steindruckfestigkeit f_{bk} ermittelt (Laborprüfung an Bohrkernen nach DIN EN 1926 [25], statistische Auswertung siehe WTA-Merkblatt 7-4, Abschnitt 6.1 [10].). Die Mörteldruckfestigkeit wird in Anlehnung an DIN 18555-9, Verfahren I oder III [15] geprüft und nach DIN EN 998-2 [22] klassifiziert (M 1, M 2,5, M 5 oder M 10).

Die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k ergibt sich aus der Güteklasse, der Steindruckfestigkeit f_{bk} und der Mörteldruckfestigkeitsklasse nach DIN EN 1996-1-1/NA, Tabelle NA.L.2 [27].

4.4.2 Zug-, Biegezug- und Schubfestigkeit

Wenn aufgrund statischer Vorgaben die Zug-, Biegezug- oder Schubfestigkeit des Mauerwerks benötigt werden, müssen diese rechnerisch aus Stein- und Mörtelkennwerten (Steinzugfestigkeit, Haftscherfestigkeit des Mörtels, Kohäsion c_0, Reibungsbeiwert μ) abgeleitet werden. Diese Kennwerte können experimentell bestimmt oder anhand von Literatur abgeschätzt werden (DIN EN 1996-1-1/NA [27], Schmidt [49]).

4.4.3 Elastizitätsmodul von Mauerwerk

Ein normatives Verfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Bestandsmauerwerk existiert derzeit nicht. In Ausnahmefällen erfolgt eine In-situ-Ermittlung mittels Flat-Jack-Verfahren oder durch Versuche nach der DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche [13]. Eine direkte Messung erfordert die Entnahme von Mauerwerksprobekörpern nach DIN EN 1052-1 [24] aus dem Bauteil, die anschließend geprüft werden. Da dies sehr aufwändig ist, erfolgt eine Abschätzung des Druck-Elastizitätsmoduls senkrecht zur Lagerfuge in der

Freiexemplar

Regel nach Gleichung (1) über die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit und einen Proportionalitätsfaktor K_e.

$$E_{ma} \cong K_e \cdot f_k \quad (1)$$

Die K_e-Werte können große Streubereiche haben. Wertebereiche für neues Mauerwerk sind in DIN EN 1996-1-1/NA, Tabelle NA.13 [27] angegeben. Für älteres Bestandsmauerwerk werden die Werte aus Tabelle 2 empfohlen. Für Knicknachweise ist der Kennwert K_e nicht höher als 700 anzusetzen.

Mauerwerksart	**K_e-Wert**
Vorindustrielles Ziegelmauerwerk bis ca. Ende 19. Jh.	300–800
Ziegelmauerwerk aus industriell hergestellten Ziegeln und hydraulischen bzw. zementhaltigen Mörteln	950–1 250
Kalksandsteinmauerwerk, Vollsteine	ca. 1 000
Kalksandsteinmauerwerk, Lochsteine	800–1 250
Bimssteinmauerwerk	800–1 100
Natursteinmauerwerk, allgemein	ca. 1 000
Kleinformatiges Bruchsteinmauerwerk	550–900
Quadermauerwerk mit geringem Fugenanteil	>1500

Tabelle 2 K_e-Werte ausgewählter Mauerwerksarten im Bestand

Zur Überprüfung der Plausibilität des Elastizitätsmoduls sollte zusätzlich eine rechnerische Abschätzung mithilfe eines geeigneten Phasenmodells erfolgen. Hierbei sind die Elastizitätsmoduln der Mauersteine E_{st} und des Mörtels E_m sowie deren Volumenanteile, die Anordnung der Komponenten und eventuell vorhandene Hohlräume zu berücksichtigen.

Für Ziegel- und Quadermauerwerk mit dünnen Fugen gilt:

$$E_{ma} = V_{st} \cdot E_{st} + V_m \cdot E_m \quad (2)$$

Für Bruchsteinmauerwerk gilt:

$$\frac{1}{E_{ma}} = \frac{V_{st}}{E_{st}} + \frac{V_m}{E_m} \quad (3)$$

Die Volumenanteile V der einzelnen Komponenten müssen in situ am jeweiligen Bauteil bestimmt werden. Der Elastizitätsmodul von Natursteinen E_{st} wird nach DIN EN 14580 [31] ermittelt. Referenzwerte hierfür finden sich bei Grimm [44]. Der Elastizitätsmodul E_m des Mauermörtels kann in der Regel nur näherungsweise abgeschätzt werden. Referenzwerte zum Elastizitätsmodul für Mörtel und für künstliche Steine sind beispielsweise in Schmidt [49] aufgeführt.

Für statische Berechnungen ist der kleinere bzw. ungünstigere Wert aus Gleichung 1 und dem entsprechenden Phasenmodell (Gleichung 2 bzw. 3) zu verwenden. In Zweifelsfällen sind Grenzwertbetrachtungen oder gezielte Versuche erforderlich.

Risse und Feuchtigkeit beeinflussen den Elastizitätsmodul stark. Sie müssen über Reduktionsfaktoren berücksichtigt werden.

4.4.4 Thermische, hygrische und chemische Dehnung

Bei der Bewertung von Schäden können die thermische, hygrische und/oder chemische Dehnung des Mauerwerks eine Rolle spielen. Häufiger als die Gesamtdehnung des Mauerwerks führen Dehnungsunterschiede zwischen Mauersteinen und Fugenmörteln zu Schäden. Referenzwerte für Dehnungskoeffizienten sind in DIN EN 1996-1-1/NA, Tabelle NA.14 [27] sowie in Freyburg [42] und Albert (Hrsg.) [50] angegeben.

Freiexemplar

5 Kennwerte für hygrothermische Nachweise

5.1 Untersuchungsziele und Vorgehensweise

Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte beschreiben das Transport- und Speicherverhalten von Mauerwerk hinsichtlich Wärmefluss, Wasserdampfdiffusion und kapillarem Flüssigwassertransport. Untersucht werden diese Eigenschaften meist dann, wenn eine thermische Ertüchtigung (z. B. nachträgliche Wärmedämmung) geplant ist oder zur Schadensdiagnostik bei Durchfeuchtungs- und Schimmelproblemen. Sie werden benötigt, um hygrothermische Berechnungen und Simulationen (z. B. mit WUFI®, DELPHIN®) durchführen zu können. Die Berechnungen sollen sicherstellen, dass durch eine Sanierung keine neuen Schäden wie etwa Kondenswasserbildung oder Frostschäden entstehen (siehe WTA-Merkblatt 6-2 [8]). Diese Parameter sind in der Regel nicht in situ ermittelbar, sondern müssen im Labor unter genormten Bedingungen und mit genormten Verfahren gemessen werden. Hierzu sind Probenahmen erforderlich, die je nach Situation einen erheblichen Eingriff in die Bausubstanz darstellen. Aus diesem Grund werden häufig Abschätzungen vorgenommen und Parameterstudien ausgeführt.

Aufgrund der meist stark streuenden Eigenschaften von Mauerwerk sollten alle wärmeschutztechnischen Parameter statistisch auswertbar untersucht werden. Es wird je Bauteil bzw. Mauerwerksart eine Mindestanzahl von fünf Proben bzw. Prüfungen empfohlen, sofern die jeweilige Prüfnorm nicht höhere Probemengen vorsieht.

5.2 Spezifische Wärmekapazität trocken

Dieser Kennwert wird i. d. R. abgeschätzt und durch Parameterstudien berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist für hygrothermische Berechnungen meist ausreichend genau. Zur experimentellen Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität gibt es materialbedingt unterschiedliche Methoden: z. B. mit einem Kalorimeter unter adiabatischen Prüfbedingungen oder mit der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC-Verfahren) nach ASTM E1269 [12] bzw. DIN 51007-1 [16].

5.3 Trockenrohdichte

Die Bestimmung der Rohdichte ist in Abschnitt 4.3 beschrieben.

5.4 Offene Porosität

Die Porosität der Mauerwerkskomponenten Stein und Mörtel muss getrennt ermittelt werden. Geeignete Normverfahren sind beispielsweise DIN EN 772-4 [20] und DIN EN 1936 [26]. Alle Normen folgen prinzipiell demselben Verfahren. Die darrtrockenen Proben werden zunächst teilweise und anschließend vollständig bis zur vollständigen Wassersättigung (i. d. R. für ≥24 h) unter Wasser getaucht. Die Form der Probekörper ist dabei unerheblich, weshalb in den Normen Zylinder, Würfel oder Prismen vorgeschlagen werden. Auch die Prüfung an Bruchstücken ist möglich. Die üblichen Mindestvolumina (25 cm^3 bei künstlichen Steinen und 60 cm^3 bei Natursteinen) dienen dazu, Einflüsse von Materialheterogenität zu minimieren. Die Ermittlung der offenen Porosität von Mörteln erfolgt analog, da es hierfür keine normativen Vorgaben gibt.

5.5 Wärmeleitfähigkeit trocken

Üblicherweise wird die Wärmeleitfähigkeit vereinfacht nach DIN EN ISO 10456 [35] aus der Rohdichte abgeschätzt. Reicht die Genauigkeit nicht aus, kann die Wärmeleitfähigkeit in grober Näherung über eine in situ gemessene Wärmestromdichte mithilfe von Wärmeflussmessplatten ermittelt werden (siehe Hoffmann/Geissler [46]).

Eine genaue Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist nach DIN EN 12664 [29] durch Messung des Wärmedurchlasswiderstands am Plattengerät oder mit Wärmeflussplatten möglich. Hierzu sind plattenförmige Mauerwerksproben notwendig, die eine Größe von mindestens 200 × 200 × 40 mm^3 und höchstens 1 000 × 1 000 × 210 mm^3 besitzen dürfen.

Die Wärmeleitfähigkeit ist feuchteabhängig und kann bei Prüfung unter entsprechenden Feuchtegehalten als Funktion der Feuchte angegeben werden.

Freiexemplar

5.6 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird in Anlehnung an DIN EN ISO 12572 [37] bestimmt. Aus der ermittelten Wasserdampfdurchlässigkeit kann die Wasserdampfdiffusionsstromdichte und aus dieser sowie der Dicke die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ eines Bauteils errechnet werden.

Zur Prüfung sind ausreichend große Proben zur Minimierung des Randeffekts zu verwenden. Die Abmessungen sind mit dem Prüfinstitut abzustimmen. Die Proben müssen schonend aus der Wand gebohrt und durch Schneiden weiterbearbeitet werden, was bei geringer Mörtelfestigkeit in der Regel zu Problemen führt. Die Prüfung an Probekörpern aus oberflächennahen Schichten ist zu bevorzugen, da die Prozesse an der Bauteiloberfläche die Diffusionsgeschwindigkeit des gesamten Bauteils bestimmen.

Die Wasserdampfdiffusion ist feuchteabhängig und muss bei Prüfung unter entsprechenden Feuchtegehalten als Funktion der Feuchte angegeben werden, wenn die zu klärende Aufgabenstellung dies erfordert.

5.7 Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) dient der Bestimmung des Flüssigwassertransports im Bauteil. Er kann im Labor u. a. in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 [38] oder DIN EN 13755 [30] bestimmt werden. Die Entnahme von Mauerwerksproben mit Stein- und Fugenanteil verursacht bei der Probenahme meist eine Mikrorissbildung in den Fugen, was die Prüfwerte untauglich macht. Deshalb werden als Grundlage für Simulationsberechnungen die Steine und Mörtel getrennt geprüft. Bei geringen Mörtelgüten bzw. geringen Fugendicken kann jedoch die Herstellung eines Mörtelprüfkörpers sehr schwierig sein. Zudem werden bei dieser Vorgehensweise nicht die Verbundeigenschaften zwischen Stein und Fuge beachtet.

Eine näherungsweise Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Verbundsystems Stein und Fuge ist an der Mauerwerksoberfläche mittels Franke-Prüfplatte oder WAM-Gerät möglich (siehe Stelzmann [51]). Dieser Näherungswert kann jedoch nur bedingt mit dem Laborwert verglichen werden, da weder die vorhandene Feuchte im Mauerwerk noch die seitliche Feuchteverteilung genau beachtet werden. Deshalb sollten Prüfungen im Außenbereich bevorzugt nach längeren Trockenphasen und mit möglichst großflächigen Verfahren erfolgen.

Die Franke-Prüfplatte hat sich vor allem zur Überprüfung des Verbunds zwischen Fugenmörtel und Stein und damit der Schlagregendichtigkeit von Mauerwerk bewährt, da im Prüffeld im Gegensatz zum Labor ein hydrostatischer Druck erzeugt wird.

Die drucklose WAM-Platte ergibt Messwerte, die sich gut an im Labor ermittelte Prüfwerte annähern. Sie ermöglicht durch Messkampagnen über mehrere Stunden auch Abschätzungen der kapillaren Wasseraufnahme in tieferen Bauteilschichten.

Wassereindringversuche mit dem Prüfröhrchen nach Karsten oder nach Pleyer (siehe Haindl/Schöner/Zirkelbach/Fitz [45]) eignen sich ausschließlich für die Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme einzelner Baustoffe, nicht jedoch für das Gesamtmauerwerk.

Freiexemplar

5.8 Sorptionsisothermen

Sorptionsisothermen beschreiben, welchen Gleichgewichtsfeuchtegehalt ein Baustoff bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte und Temperatur annimmt. Sie dienen als Eingangswerte für hygrothermische Berechnungen sowie der Beurteilung des Feuchtespeichervermögens. Auch zur Beurteilung hygroskopischer Feuchtegehalte können sie herangezogen werden (vgl. Abschnitte 6.1.4 und 6.1.5). Die Sorptionsisothermen werden nach DIN EN ISO 12571 [36] in der Klimakammer oder im Exsikkator über definierten Salzlösungen bestimmt. Unter isothermen Bedingungen werden die gedarrten Prüfkörper nacheinander in eine Reihe von Prüfumgebungen mit stufenweise wachsender relativer Luftfeuchte eingebracht. Die jeweilige Ausgleichsfeuchte bei Massekonstanz wird ermittelt. Die Prüfkörper müssen für das Mauerwerk repräsentativ sein und eine Masse von mindestens 10 g aufweisen. Bei der Auswahl des Stichprobenumfangs ist die Heterogenität der Materialien zu berücksichtigen. Stehen nur sehr kleine Probemengen zur Verfügung, kann die Untersuchung von Sorptionsisothermen näherungsweise auch mittels dynamischer Wasserdampfsorptionsanalyse (DVS) erfolgen (siehe Garbalińska/Bochenek [43]).

6 Feuchtetechnische Kennwerte

6.1 Feuchtezustand

6.1.1 Untersuchungsziele, Messverfahren und Probenahme

Feuchtetechnische Kennwerte haben Einfluss auf Festigkeit, Formänderungsverhalten, Wärmeschutz, Verwitterungsverhalten, Hygiene und biologische Belastung. Sie sind eine wichtige Grundlage zur Bewertung von Feuchte- und Verwitterungsschäden (z. B. Feuchteflecken, Salzausblühungen, Farb- oder Putzabplatzungen, Schäden an Mauersteinen oder Fugen) und für die gezielte Auswahl und Planung von Instandsetzungsmaßnahmen.

Mauersteine und Mörtel können lokal sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, insbesondere hinsichtlich der Porosität, der Porenstruktur oder dem Gehalt an hygroskopischen Salzen, die die Feuchteaufnahme beeinflussen. Daher sollte, je nach Fragestellung, der Umfang der Probenahme möglichst groß gewählt werden.

Für die Beurteilung der Feuchtesituation im Mauerwerk sind in der Regel die Bestimmung des Wassergehalts, der Sättigungsfeuchte und der hygroskopischen Ausgleichsfeuchte der einzelnen Komponenten erforderlich. Aus diesen Kennwerten können die Durchfeuchtungsgrade rechnerisch ermittelt werden.

Bemerkungen zu zerstörungsfreien Messverfahren

Zerstörungsfreie Messverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte dürfen nur vorbereitend, orientierend oder begleitend verwendet werden, da mit ihnen lediglich elektrophysikalische Referenzwerte bestimmt werden, die keine gesicherte Umrechnung in Feuchtewerte zulassen.

Die Verfahren sind im WTA-Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen [11] beschrieben. Dort werden das Messprinzip, das Vorgehen bei der Messung sowie Randbedingungen und Anwendungsgrenzen aufgeführt.

Probenahme

Die Entnahme der Proben erfolgt möglichst aus Bohrkernen. Die Bohrkerne sind mittels luftgekühltem Kernbohrgerät mit Softschlageffekt trocken aus dem Mauerwerk zu bohren. Der Innendurchmesser der diamantbesetzten Trockenbohrkronen sollte zwischen 50 und 80 mm betragen.

Die Entnahme von Bohrmehlproben verursacht eine geringere Zerstörung des Mauerwerks als die Bohrkernentnahme, was bei sensibler Bausubstanz ein Grund für die Wahl dieses Verfahrens sein kann. Bohrmehlproben ermöglichen jedoch nur eine näherungsweise Feuchtebestimmung, denn aufgrund der hohen Oberfläche des Bohrmehls trocknet dieses bereits an der Luft bis zum Verpacken, wodurch die Ergebnisse verfälscht werden. An Bohrmehl können zudem keine Durchfeuchtungsgrade bestimmt werden.

Bohrmehlproben sollten daher bei Feuchteuntersuchungen anhand von Bohrkernproben kalibriert werden. Die Bohrmehlentnahme ist mit einem langsam drehenden Bohrhammer (Umdrehungszahl ca. 300 U/min) vorzunehmen. Der Durchmesser des Bohrers sollte ca. 20 mm betragen. Die maximale Entnahmetiefe sollte 50 cm nicht überschreiten.

Unmittelbar nach der Entnahme sind die Proben luftdicht zu verpacken (z. B. Folien, Schraubgefäße), zu kennzeichnen und zu dokumentieren. Während der Lagerung bis zur Prüfung sowie dem Transport zum Labor sind die Proben vor Hitzeeinwirkung zu schützen. Bei der Feuchtebestimmung ist das in der Verpackung gegebenenfalls ausgefallene Tauwasser mitzuberücksichtigen.

6.1.2 Feuchtegehalt (Wassergehalt)

Der Feuchtegehalt (Wassergehalt) u gibt an, wie viel Wasser ein Baustoff bezogen auf seine Trockenrohmasse enthält. Er dient der Beurteilung des Durchfeuchtungszustands. Die Bestimmung des Feuchtegehalts u in M.-% erfolgt nach dem Darr-Verfahren bei 105 °C bis zur Massekonstanz. Bei vermutetem Gipsgehalt sind die Proben bei <40 °C zu trocknen. Das grundsätzliche Vorgehen ist im WTA-Merkblatt 4-11, Abschnitt 2.2 [7] beschrieben.

6.1.3 Durchfeuchtungsgrad

Bei Bohrkernproben erfolgt nach der Bestimmung des Feuchtegehalts die Ermittlung des freien Wassergehalts u_f in M.-% oder der Sättigungsfeuchte u_{max} in M.-% gemäß WTA-Merkblatt 4-11, Abschnitt 2.6 bzw. 2.7 [7]. Da sich die Sättigungsfeuchte u_{max} nur unter Vakuum feststellen lässt, wird meist stellvertretend der freie Wassergehalt u_f bestimmt. Die Proben werden dazu vor der Wägung bis zur Massekonstanz (0,1 M.-% Masseänderung/24 h) drucklos unter Wasser gelagert.

Freiexemplar

Der Quotient des ermittelten Feuchtegehalts u und des freien Wassergehalts u_f stellt den Durchfeuchtungsgrad DFG in % dar. Der Durchfeuchtungsgrad gibt an, welcher Anteil des für Wasser zugänglichen Porenvolumens zum Zeitpunkt der Probenahme mit Wasser gefüllt war. Durchfeuchtungsgrade DFG ≥100 % weisen auf langanhaltende Durchfeuchtung oder Druckwasser hin.

6.1.4 Hygroskopischer Feuchtegehalt (Sorptionsfeuchte)

Der hygroskopische Feuchtegehalt (Sorptionsfeuchte) $u_{rel.\ Luftfeuchte}$ in M.-% dient der Beurteilung des gemessenen Feuchtegehalts bzw. des Durchfeuchtungsgrads. Die Bestimmung erfolgt in der Regel an Proben der Mauerwerksoberfläche, da hier erhöhte Salzkonzentrationen und daraus folgend erhöhte hygroskopische Feuchten zu erwarten sind. Das Verfahren ist im WTA-Merkblatt 4-11, Abschnitt 2.3 [7] beschrieben.

Zur Bestimmung des hygroskopischen Feuchtegehalts werden die nach Abschnitt 6.1.2 darrgetrockneten Proben unter konstanten Klimabedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte) bis zur Massekonstanz gelagert. Dabei sollten die Klimabedingungen der Situation bzw. der geplanten Situation am Bauwerk entsprechen.

6.1.5 Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad

Der Quotient aus dem ermittelten hygroskopischen Feuchtegehalt $u_{rel.\ Luftfeuchte}$ und dem freien Wassergehalt u_f ergibt den hygroskopischen Durchfeuchtungsgrad DFG_{hygr} in %. Der so bestimmte Wert wird anschließend mit typischen Durchfeuchtungsgraden gleichartiger, unbelasteter Baustoffe verglichen.

Referenzwerte (Sorptionsisothermen bzw. Ausgleichsfeuchten und Sättigungsfeuchten von häufig vorkommenden Baustoffen), aus denen sich typische Durchfeuchtungsgrade unbelasteter Baustoffe ableiten lassen, finden sich z. B. in der Internet-Datenbank MASEA [53] des Fraunhofer Institut für Bauphysik oder im WTA-Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen, Anlage 4 [11].

Liegt der gemessene hygroskopische Durchfeuchtungsgrad unter gleichen Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen deutlich über den typischen Werten des unbelasteten Baustoffs, ist von einer hygroskopischen Wirkung eingelagerter Salze auszugehen.

6.1.6 Feuchteverteilung

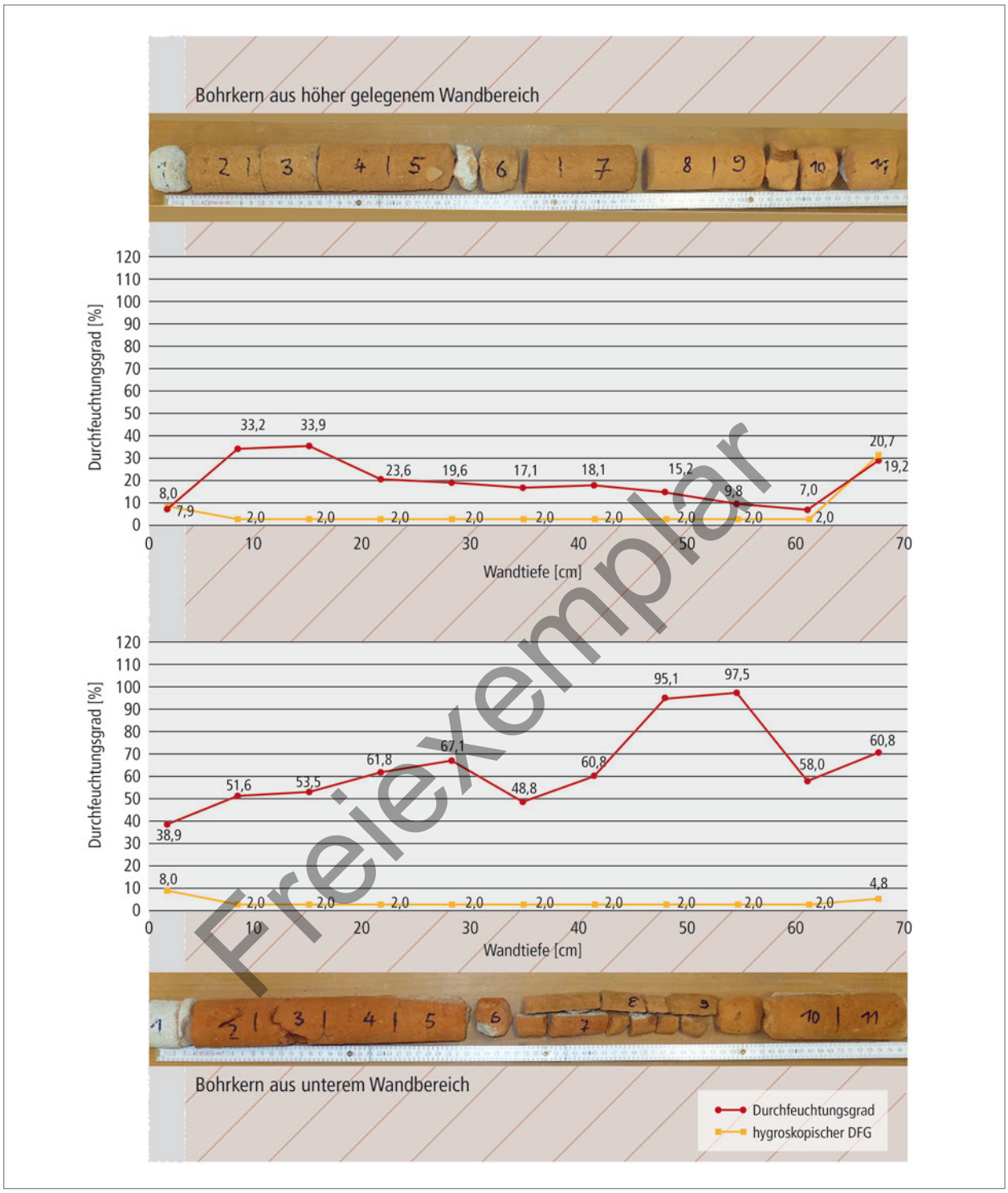
Zur Bestimmung der räumlichen Feuchteverteilung werden senkrecht zur Maueroberfläche Messachsen für Höhen- und Tiefenprofile festgelegt. Entlang dieser Achsen werden Bohrkernproben oder Bohrmehlproben aus unterschiedlichen Tiefen entnommen. Bohrkernproben sind Bohrmehlproben vorzuziehen (vgl. Hinweise zur Probenahme in Abschnitt 6.1.1). Die Anzahl der Proben ist abhängig von den Steinformaten und der Wanddicke zu wählen. Idealerweise werden Proben aus Höhenprofilen (2 bis 3 übereinanderliegende Stellen) mit Proben aus Tiefenprofilen (je Tiefenprofil mindestens 3 bis 4 Tiefenschichten, angepasst an die spezifische Situation) kombiniert untersucht.

Für ein Tiefenprofil (horizontale Feuchteverteilung im Bauteil) sollte die Bohrtiefe mindestens zwei Drittel der Wanddicke betragen. Ein Höhenprofil (Feuchteverteilung über die Bauteilhöhe) wird aus zwei oder mehr übereinanderliegenden Tiefenprofilen erstellt. An den Proben werden die Durchfeuchtungsgrade bestimmt. Die Feuchteverteilung im Bauteil ergibt sich aus den Durchfeuchtungsgraden (DFG) der Einzelproben.

Die Feuchteverteilung gibt Hinweise auf die Ursachen der Durchfeuchtung und ist Voraussetzung für die Planung gezielter Instandsetzungsmaßnahmen, wie z. B. nachträgliche Abdichtungen (Bild 2).

Beim Einsatz von Injektionsverfahren für die Mauerwerksabdichtung kann ein zu hoher Durchfeuchtungsgrad die Eignung bestimmter Injektionsmittel einschränken. Der Bezug auf den mittleren Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerks kann zu Fehlanwendungen führen. Aussagekräftiger ist es, die Durchfeuchtungsgrade von Stein- und Mörtelproben getrennt zu ermitteln (Bild 3).

Freiexemplar



Freiexemplar

Bild 2 Beispiel für ein Höhenprofil der Wandfeuchte auf Basis von zwei Tiefenprofilen über die gesamte Wanddicke (© Jonny Henkel, Ahrensfelde / Fraunhofer IRB, Stuttgart)

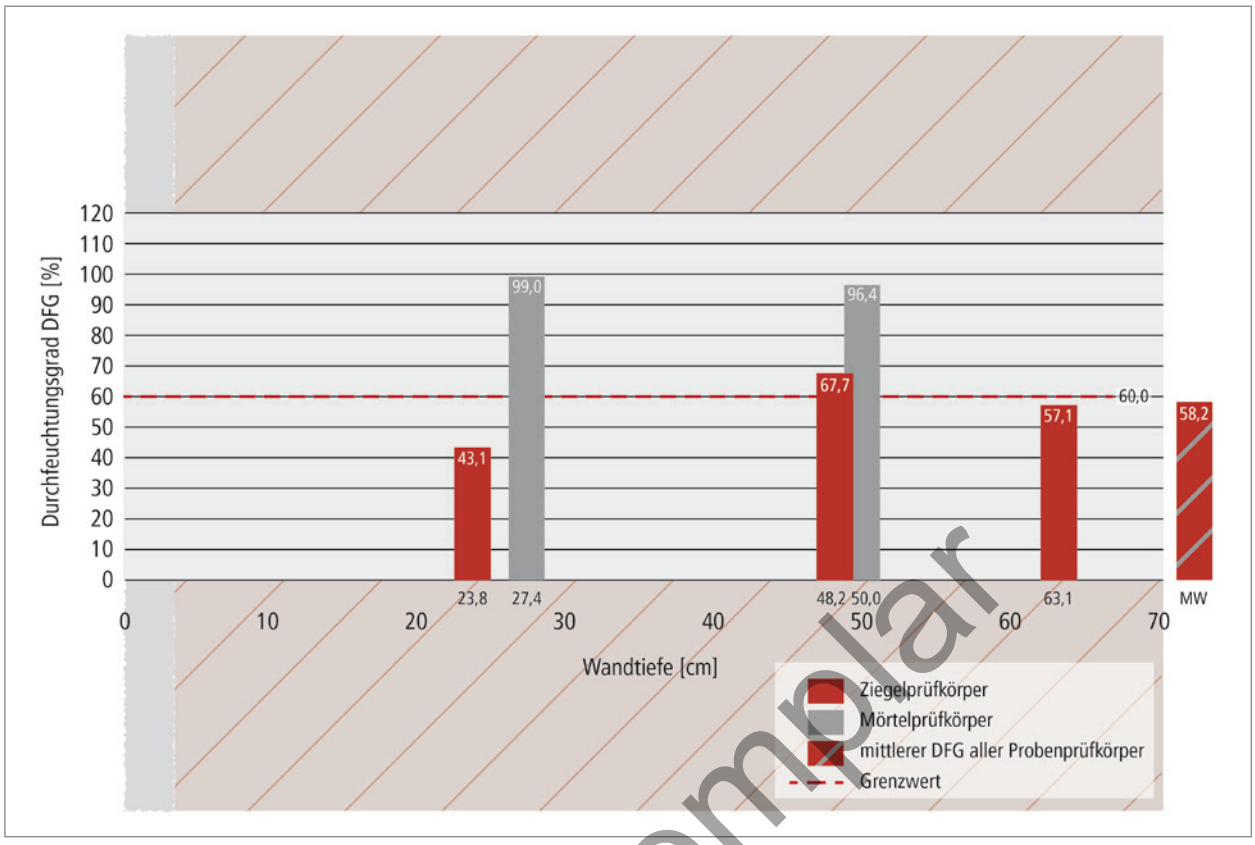


Bild 3 Beispiel für gemessene Durchfeuchtungsgrade eines Bohrkerns, nach Materialart getrennt, im Vergleich zum herstellerspezifischen Anwendungsgrenzwert eines Injektionsmittels (hier 60 %) (© Axel Dominik / Fraunhofer IRB, Stuttgart)

Freiexemplar

6.2 Frostwiderstandsfähigkeit

Wenn Schadensbilder am Objekt auf Schäden durch Frost-Tau-Wechsel hindeuten, sind Untersuchungen zur Frostwiderstandsfähigkeit notwendig. Die in den Normen definierten Prüfverfahren zur Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit von Baustoffen beziehen sich auf fabrikneue Materialien und haben nur eine geringe Aussagekraft für historische und bereits bewitterte Bauteile. Geeigneter ist für Ziegel eine Einschätzung über Referenzparameter nach Freyburg [42] oder eine Beurteilung mittels der Bestimmung der Porenradienverteilung nach Franke/Bentrup [41]. Der Frostwiderstand von Naturstein kann nach DIN EN 12371 [28] bestimmt werden. Für Mörtel existiert kein genormtes Prüfverfahren. Je nach Fragestellung kann auf DIN EN 14617-5 [32], das Verfahren nach Knöfel/Schubert [47] oder das BAW-Merkblatt Frostprüfung von Beton [39] zurückgegriffen werden.

7 Chemisch-mineralogische Stein- und Mörtelkennwerte

7.1 Stein- und Mörtelzusammensetzung

7.1.1 Untersuchungsziele und Vorgehensweise

Chemisch-mineralogische Untersuchungen werden durchgeführt, wenn die Art des Steins oder Mörtels unbekannt ist oder wenn am Mauerwerk schädliche Veränderungen auftreten, die auf die Zusammensetzung von Stein oder Mörtel zurückzuführen sein könnten. Solche Untersuchungen sind häufig für die Schadensprognose sowie für die Planung von Konservierungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich.

Wesentliche Fragestellungen betreffen die Bestimmung der Baustoffbestandteile (Mineralbestand, Korngefüge), den Gehalt an löslichen, quellfähigen oder treibenden Bestandteilen, eingetragene Verunreinigungen sowie Baustoffporosität, Porenstruktur und Anisotropie.

Die Proben werden zunächst einfachen Voruntersuchungen unterzogen (siehe Abschnitt 7.1.2) und visuell auf Salzausblühungen, Feuchteflecken, Verfärbungen, Brandspuren, Risse, Mikrorisse sowie vorausgegangene Reparaturen geprüft. Bei Bedarf folgen genauere Analysen (siehe Abschnitt 7.1.3).

7.1.2 Einfache In-situ-Untersuchungen

Es erfolgt zunächst eine visuelle Beurteilung (Sichtprüfung) der Baustoffe. Dabei werden Farbe, Körnigkeit, der makroskopisch erkennbare Mineralbestand und das Bindemittel (Matrix) sowie die Stein- oder Gesteinsart grob bestimmt. Zusätzlich werden Ablösungen, Schalenbildung, Verschmutzungen, Ausblühungen, Verfärbungen, Krusten, Feuchteflecken, Risse und der Stein-Mörtel-Verbund betrachtet.

Die haptische Beurteilung (Tastuntersuchung) durch Anfassen und Reiben ermöglicht es, Oberflächenveränderungen (z. B. Absanden und Abmehlen) festzustellen.

Einfache Oberflächentests wie Ritzen und Klopfen geben Hinweise auf die Oberflächenhärte sowie auf Hohllagen. Weitere einfache Testverfahren sind der Sprühtest, der Wassertropfentest, die Überprüfung des Wassersaugverhaltens mit dem Karsten-Prüfröhrchen (siehe Abschnitt 5.7) oder der Carbonat-Nachweis durch Besprühen mit 10%iger Salzsäurelösung (nicht geeignet bei Dolomit).

7.1.3 Laboranalytische Untersuchungen

Reichen einfache Untersuchungen zur Beurteilung nicht aus, werden genauere Analysen durchgeführt. Tabelle 3 enthält Analyseverfahren für die häufigsten Fragestellungen. Zur Materialuntersuchung sind Stein- und Mörtelproben in Form von Handstücken, Bohrkernen, Anschliffen, Dünnschliffen, Bohrmehl oder Pulver notwendig. Die Untersuchungen können nur in Fachlaboren durchgeführt werden.

Baustoff	Fragestellung (Untersuchungsziel)	Untersuchungsverfahren
Alle Mauersteinarten	Gefüge (Porenformen, Textur, Struktur, Isotropie)	Auflicht- und Dünnschliffmikroskopie
	Haupt- und Nebenmineralbestand (kristalliner Mineralbestand, nicht hydratisierte Zementphasen, reaktive Bestandteile)	Röntgendiffraktometrie (XRD)
	Bindemittel (Matrix)	Auflicht- und Dünnschliffmikroskopie, ggf. Rasterelektronenmikroskopie (REM)
	Chemische Zusammensetzung (Elemente, Oxide)	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
	Oberflächenbeschaffenheit	Auflichtmikroskopie
Natursteine (Sediment-, magmatische- und metamorphe Gesteine)	Kalkgehalt	Salzsäuretest, Kalkgehalt nach Scheibler (in Anlehnung an DIN 18129 [14])
	Gipsgehalt	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), nasschemische Analyse, Röntgendiffraktometrie (XRD)
	tonige Bestandteile	Röntgendiffraktometrie (XRD)
Künstliche Mauersteine	temperaturabhängige Mineralphasen von Ziegeln	Thermogravimetrische Analyse (TGA, DTA)

Tabelle 3 Chemisch-mineralogische Fragestellungen und Untersuchungsverfahren

Freiexemplar

Baustoff	Fragestellung (Untersuchungsziel)	Untersuchungsverfahren
Mörtel	Zusammensetzung des Bindemittels	Dünnschliffmikroskopie, Röntgendiffraktometrie (XRD), Nasschemische Analyse, Kalkgehalt nach Scheibler, thermogravimetrische Analyse (TGA, DTA)
	Zusammensetzung der Zuschlagstoffe	Röntgendiffraktometrie (XRD)
	Sieblinie des Zuschlags, Größtkorn, Kornform	Säureaufschluss und Siebanalyse nach DIN 66165-1 [17], DIN 66165-2 [18] und DIN EN 1015-1 [23]; Dünnschliffmikroskopie
	Carbonatisierung	Phenolphthalein-Test* an frischen Bruchflächen * Phenolphthalein gilt als potenziell krebserzeugend; geeignete Schutzmaßnahmen sind erforderlich. Alternativ kann Thymolphthalein verwendet werden.
	Porenstruktur	Auflicht- und Dünnschliffmikroskopie
	Gipsgehalt	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), nasschemische Analyse, Röntgendiffraktometrie (XRD)
	Organische Bestandteile	Infrarotspektroskopie, Kernspinresonanzspektroskopie (Solid-State NMR, Solution NMR)

Tabelle 3 Chemisch-mineralogische Fragestellungen und Untersuchungsverfahren

Freiexemplar

7.2 Gipshaltige Bestandteile

Gipshaltige Baustoffe erfordern spezielle Untersuchungsmethoden, die im WTA-Merkblatt 2-11 [2] genau beschrieben sind. Er kann zu gefährlichen Treiberscheinungen führen. Bei Hinweisen auf gipshaltige Bestandteile im Mauerwerk (geologische Gipsvorkommen in der Umgebung, Aussehen der Baustoffe, Röntgendiffraktometrie-Befund) ist unbedingt das WTA-Merkblatt 2-11 [2] zu beachten.

7.3 Bauschädliche Salze

7.3.1 Grundlagen, Probenahme und Untersuchungsstrategie

Salze können bereits in den Baustoffen vorhanden sein oder von außen ins Mauerwerk eindringen. Durch Lösungs- und Kristallisationsprozesse können sie Schäden am Mauerwerk verursachen. Um Ausblühungen oder Gefügezerstörungen zu beurteilen sowie Instandsetzungsmaßnahmen wie Injektionen, Beschichtungen, Putzerneuerungen oder Fugeninstandsetzungen zu planen, ist es notwendig, Art und Umfang der Salzbelastung festzustellen.

Salze werden gelöst durch das Porensystem der Fugen und der Steine transportiert. Je höher die Löslichkeit eines Salzes ist, desto weiter wird es im Mauerwerk transportiert. Kristallisationsvorgänge finden vor allem in den Verdunstungszonen an der Mauerwerksoberfläche (z. B. an Steinoberflächen, Mörtelfugen oder Putzen) statt. Da der Salzgehalt von Mörteln und Mauersteinen stark variieren kann, ist ein Vergleich nur zwischen Proben desselben Baustoffs sinnvoll.

Die Auswahl der Probenahmestellen richtet sich nach den sichtbaren Schadensbildern (Flecken, Ausblühungen) und der zu erwartenden Verteilung der Salze im Bauteil. Da sich Salze je nach Löslichkeit in unterschiedlichen Höhen und Tiefen anreichern, sollte die Probenahme in Höhen- und Tiefenprofilen erfolgen (vgl. Abschnitt 6.1.6). Normalerweise kann der Gehalt an wasserlöslichen Salzen direkt an den Proben ermittelt werden, die bereits für die Bestimmung des Feuchtegehalts entnommen wurden. Bei der Probenahme sind zudem die relative Luftfeuchtigkeit und die Umgebungstemperatur zu dokumentieren.

Für die Untersuchung des Salzgehalts gibt es eine Reihe von bewährten Verfahren. Einen ersten Überblick über den Untersuchungsbedarf geben Schnelltests vor Ort oder im Labor (vgl. Abschnitte 7.3.2 und 7.3.3).

Mit instrumenteller Messtechnik (vgl. Abschnitt 7.3.4) können die Konzentrationen aller gängigen Anionen und Kationen sehr genau bestimmt werden. Aufgrund der höheren Kosten werden diese Methoden in der Regel nur bei Proben mit erhöhter Salzbelastung oder zur genauen Differenzierung des Schadenpotenzials eingesetzt.

7.3.2 Orientierende Bestimmung der Salzbelastung mittels Schnelltests

Eine orientierende Voruntersuchung kann mittels Teststreifen durchgeführt werden. Die Vorgaben und Einschränkungen des Herstellers sind zu beachten. Die Tests dienen als Entscheidungshilfe, ob detailliertere Salzuntersuchungen durchgeführt werden müssen. Die Untersuchung sichtbarer Ausblühungen (Schabeproben) ist sinnvoll, wenn ein schneller Überblick über die Art der im Mauerwerk vorkommenden Anionen (Sulfat, Chlorid und Nitrat) gewonnen werden soll. Diese Untersuchung kann auch vor Ort durchgeführt werden.

Zur Abschätzung des Salzgehalts im Mauerwerk müssen Proben aus dem Mauermörtel und den Mauersteinen entnommen und untersucht werden. Der Salzgehalt wird in M.-% bezogen auf die Masse der trockenen Probe angegeben. Liegen die Testergebnisse oberhalb der folgenden Werte (siehe auch WTA-Merkblatt 2-9, Tabelle 6.2 [1]), sind genauere Untersuchungen notwendig:

- Sulfate >0,1 M.-%,
- Chloride >0,05 M.-%,
- Nitrate >0,03 M.-%.

7.3.3 Abschätzung des Gesamtsalzgehalts mittels Leitfähigkeitsmessung

Zur Abschätzung der quantitativen Salzbelastung eignet sich die Bestimmung der Leitfähigkeit. Dafür wird eine wässrige Lösung der gemahlenen Proben mit deionisiertem/destilliertem Wasser hergestellt und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Mithilfe von Referenzkurven kann der Messwert in einen massebezogenen Salzgehalt umgerechnet werden (DIN EN 16455 [34]).

Leitfähigkeitsmessungen erfassen ausschließlich die Summe der löslichen Salze. Aussagen zur Art der Salze und damit dem genauen Schadenspotenzial sind mit dieser Methode nicht möglich. Bei hoch alkalischen oder stark gipshaltigen Baustoffen gibt es ebenfalls Einschränkungen. Um zu verhindern, dass bei der Untersuchung auch mäßig oder schwer lösliche Salze wie Gips und Kalzit erfasst werden, sollte eine möglichst geringe Verdünnung der Probe genutzt werden. Bei einem Ansatz von Probenmenge zu Wasser im Verhältnis 1:1 ist erst bei einem umgerechneten Salzgehalt von >0,3 M.-% eine Ionenanalyse notwendig.

7.3.4 Quantitative Bestimmung von Anionen und Kationen

Durch eine Analyse der Kationen- und Anionenkonzentrationen können Salzarten und Salzgemische identifiziert und das Schadenspotenzial beurteilt werden. Eine quantitative Bestimmung der Anionen- und Kationenbelastung erfolgt standardmäßig mittels Ionenchromatografie oder ähnlichen Verfahren im Fachlabor. Dazu wird eine Probe von ca. 5 bis 20 g benötigt.

7.3.5 Mineralogische Bestimmung kristallin vorliegender Salze

Zur genaueren Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung und des Schadenspotenzials können Salzausblühungen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) untersucht werden.

7.3.6 Bewertung der Salzbelastung

Die Auswirkung bauschädlicher Salze ist abhängig von der Art der Salze, ihrer Konzentration und Verteilung im Bauteil und der Verfügbarkeit von Feuchtigkeit. Die schädigende Wirkung wird insbesondere durch die Löslichkeit und die hygroskopischen Eigenschaften der Salzgemische bestimmt. Zu beachten ist, dass sowohl die Konzentration als auch die Zusammensetzung der bauschädigenden Salze im dreidimensionalen Mauerwerkskörper sowie an der Mauerwerksoberfläche und im Verlauf der Zeit sehr stark variieren können. Diese Werte hängen zudem wesentlich von den Trocknungsvorgängen am Mauerwerk ab. Einzelne Messungen geben daher stets nur Hinweise auf den tatsächlichen Schadenszustand. Die Beurteilung von Salzschäden richtet sich nach der jeweiligen Aufgabenstellung.

Die Bewertung der Messwerte sollte immer unter Berücksichtigung der baulichen Situation und der klimatischen Randbedingungen durch einen Fachplaner oder einen sachkundigen Gutachter erfolgen. Allgemeingültige Grenzwerte können aufgrund der komplexen Schadensmechanismen der unterschiedlichen Salzmischungen nicht angegeben werden.

Freiexemplar

Zur Entscheidungsfindung bezüglich Funktionsputzen auf Mauerwerk können die Tabellen 6.1 und 6.2 des WTA-Merkblatts 2-9 [1] als Orientierungshilfe verwendet werden. Hinweise zu schädlichen Salzen in porösen mineralischen Baustoffen bietet zudem auch Abschnitt 1.2 des WTA-Merkblatts 3-13 [5].

7.4 Brandschäden

Bei brandbeanspruchten Bauteilen ist der Einfluss der Brandeinwirkung auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit zu untersuchen. Hinweise auf eine Brandbeanspruchung können Risse, Abschalungen, Abscherbelungen, Abplatzungen an den Mauersteinen sowie Farbveränderungen an Steinen und Mörteln sein.

Liegen Hinweise auf mögliche Brandschäden vor, sollten geschädigte und ungeschädigte Bereiche des Mauerwerks vergleichend untersucht werden. Dazu sind sowohl die Steine als auch der Mörtel zu prüfen. Als zerstörungsfreie Voruntersuchung eignet sich die Impulslaufzeitmessung zur Lokalisierung geschädigter Bereiche.

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit sind Rohdichte und Druckfestigkeit zu ermitteln (siehe Abschnitt 4). Der Einfluss des Brandes auf die Dauerhaftigkeit kann anhand des freien Wassergehalts (Abschnitt 6.1.3) der Baustoffe abgeschätzt werden. Ein gegenüber ungeschädigten Bereichen erhöhter freier Wassergehalt weist auf ein vergrößertes Porenvolumen hin, was die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen kann.

Bei Bauteilen, die der Witterung ausgesetzt sind, ist zusätzlich die Frostwiderstandsfähigkeit zu prüfen (siehe Abschnitt 6.2).

Bestätigen die Untersuchungen einen Brandschaden und sind die Festigkeiten nicht ausreichend, sind konstruktive Sicherungsmaßnahmen zur Wiederherstellung der Tragfähigkeit zu ergreifen. Bei Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit können Maßnahmen wie der Austausch von Steinen, Steinergänzungen oder Oberflächenschutz ausreichen.

Freiexemplar

8 Literatur

8.1 WTA-Merkblätter und Sachstandberichte

[1] WTA-Merkblatt 2-9 Ausgabe: 03.2020/D — Sanierputzsysteme, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 2 »Oberflächentechnologie«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2020

[2] WTA-Merkblatt 2-11 Ausgabe: 08.2018/D — Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 2 »Oberflächentechnologie«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2018

[3] WTA-Merkblatt 3-9-95/D — Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 3 »Naturstein und Kunststein«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1997

[4] WTA-Merkblatt 3-10-97/D — Natursteinrestaurierung nach WTA XII: Zustands- und Materialkataster für Natursteinbauwerke, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 3 »Naturstein und Kunststein«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998

[5] WTA-Merkblatt 3-13 Ausgabe: 12.2019/D — Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 3 »Naturstein und Kunststein«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2019

[6] WTA-Merkblatt 3-20 Ausgabe: 09.2026/D — Instandsetzung von historischem Ziegelmauerwerk, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 3 »Naturstein und Kunststein«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2026

[7]	WTA-Merkblatt 4-11 Ausgabe: 03.2016/D	Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 4 »Bauwerksabdichtung«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2016
[8]	WTA-Merkblatt 6-2 Ausgabe: 10.2025/D	Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 6 »Bauphysik«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2025
[9]	WTA-Merkblatt 7-1 Ausgabe: 12.2018/D	Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 7 »Tragverhalten und Schadensdiagnostik«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2019
[10]	WTA-Merkblatt 7-4 Ausgabe: 11.2021/D	Ermittlung der Druckfestigkeit von Bestandsmauerwerk aus künstlichen kleinformatigen Steinen, Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 7 »Tragverhalten und Schadensdiagnostik«, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2022
[11]	Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen	Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 4 »Bauwerksabdichtung«, Arbeitsgruppe 4-11, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004

8.2 Normen und Richtlinien

[12]	ASTM E 1269:2024	Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2024
[13]	DAfStb-Richtlinie Ausgabe:2020-07	Belastungsversuche an Betonbauwerken, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), DIN Media GmbH, Berlin 2020
[14]	DIN 18129:2011-07	Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Kalkgehaltsbestimmung, DIN Media GmbH, Berlin
[15]	DIN 18555-9:2019-04	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln, DIN Media GmbH, Berlin
[16]	DIN 51007-1:2024-08	Thermische Analyse (TA) – Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, DIN Media GmbH, Berlin
[17]	DIN 66165-1:2022-06	Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 1: Grundlagen, DIN Media GmbH, Berlin
[18]	DIN 66165-2:2016-08	Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 2: Durchführung, DIN Media GmbH, Berlin
[19]	DIN EN 771-6:2015-11	Festlegungen für Mauersteine - Teil 6: Natursteine; Deutsche Fassung EN 771-6:2011+A1:2015, DIN Media GmbH, Berlin
[20]	DIN EN 772-4:1998-10	Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 4: Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein; Deutsche Fassung EN 772-4:1998, DIN Media GmbH, Berlin
[21]	DIN EN 772-13:2000-09	Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen); Deutsche Fassung EN 772-13:2000, DIN Media GmbH, Berlin

Freiexemplar

[22]	DIN EN 998-2:2017-02	Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel; Deutsche Fassung EN 998-2:2016, DIN Media GmbH, Berlin
[23]	DIN EN 1015-1:2007-05	Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung (durch Siebanalyse); Deutsche Fassung EN 1015-1:1998+A1:2006, DIN Media GmbH, Berlin
[24]	DIN EN 1052-1:1998-12	Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 1052-1:1998, DIN Media GmbH, Berlin
[25]	DIN EN 1926:2007-03	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit; Deutsche Fassung EN 1926:2006, DIN Media GmbH, Berlin
[26]	DIN EN 1936:2007-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität; Deutsche Fassung EN 1936:2006, DIN Media GmbH, Berlin
[27]	DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, DIN Media GmbH, Berlin
[28]	DIN EN 12371:2010-07	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes; Deutsche Fassung EN 12371:2010, DIN Media GmbH, Berlin
[29]	DIN EN 12664:2001-05	Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001, DIN Media GmbH, Berlin
[30]	DIN EN 13755:2008-08	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck; Deutsche Fassung EN 13755:2008, DIN Media GmbH, Berlin
[31]	DIN EN 14580:2005-07	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls; Deutsche Fassung EN 14580:2005, DIN Media GmbH, Berlin
[32]	DIN EN 14617-5:2012-06	Künstlich hergestellter Stein – Prüfverfahren – Teil 5: Bestimmung der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 14617-5:2012, DIN Media GmbH, Berlin
[33]	DIN EN 16085:2012-10	Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren der Probenahme an Materialien des kulturellen Erbes – Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 16085:2012, DIN Media GmbH, Berlin
[34]	DIN EN 16455:2014-12	Erhaltung des kulturellen Erbes – Auflösung und Bestimmung von löslichen Salzen in Naturstein und artverwandten Materialien des kulturellen Erbes; Deutsche Fassung EN 16455:2014, DIN Media GmbH, Berlin
[35]	DIN EN ISO 10456:2010-05	Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009, DIN Media GmbH, Berlin
[36]	DIN EN ISO 12571:2022-04	Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2021); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2021, DIN Media GmbH, Berlin

Freiexemplar

[37] DIN EN ISO 12572:2025-03 — Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016 + Amd 1:2024); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016 + A1:2024, DIN Media GmbH, Berlin

[38] DIN EN ISO 15148:2018-12 — Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016, DIN Media GmbH, Berlin

[39] BAW-Merkblatt Ausgabe 12.2025 — Frostprüfung von Beton (MFB), Hrsg.: Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

8.3 Bücher und Zeitschriften

[40] Ahnert, R.; Krause, K. H. — Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. Zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1. 7. Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 2009

[41] Franke, L.; Bentrup, H. — Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln in Hinblick auf lange Lebensdauer. In: ZI Ziegelindustrie International 7-8, 1993, S. 483-492 und Ziegelindustrie International 9, 1993, S. 528–536, (Teil 2)

[42] Freyburg, S. — Baukeramische Gefüge und Dauerhaftigkeit. Ein Beitrag zur Erhaltung historischer Ziegelmauerwerke. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar 2004

[43] Garbalińska, H.; Bochenek, M. — Experimentelle Ermittlung der Desorptionsisothermen von Porenbeton unterschiedlicher Dichte mit der Standardmethode SSS und mit der DVS-Technik. In: Bauphysik (Jg. 39), Heft 3, 2017, S. 191–196

[44] Grimm, W.-D. — Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. 2., erweiterte Aufl.; 2 Bände. Ulm: Ebner Verlag, 2018

[45] Haindl, K.; Schöner, T.; Zirkelbach, D.; Fitz, C. — Was ist bei Karsten & Co. zu beachten? Beurteilung des Regenschutzes einer Fassade. In: B+B Bauen im Bestand (Jg. 39), Heft 3, 2016, S. 33–37.

[46] Hoffmann, C.; Geissler, A. — Die zerstörungsfreie Messung des U-Wertes von Aussenbauteilen. Eine praxisorientierte Anwendungshilfe. Bern: EnergieSchweiz, 2021. DOI: 10.26041/fhnw-6039. Online verfüg-bar unter: https://irf.fhnw.ch/handle/11654/39002 (abgerufen am 31.10.2025)

[47] Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.) — Handbuch Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Berlin: Ernst & Sohn, 1993

[48] Patitz, G. — Einsatzmöglichkeiten des Radarverfahrens bei der Bewertung von Mauerwerk. In [52], S. 96–103

[49] Schmidt, U. — Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk. In: Schermer, D.; Brehm, E. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2026. Berlin: Ernst & Sohn, 2026, A1–A24

[50] Albert, A. (Hrsg.) — Schneider – Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 26., überarbeitete Auflage. Köln: Reguvis Fachmedien, 2024

Freiexemplar

[51] Stelzmann, M. Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur Untersuchung des Schlagregenschutzes von Fassaden denkmalgeschützter Bestandsgebäude. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2020. Hrsg. Technische Universität Dresden, Zentrum für Bauforschung – Institut für Bauklimatik; Grunewald, J. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020.

[52] Wigger, H. (Hrsg.) Mauerwerk aus künstlichen Steinen. Tragfähigkeit im Bestand bewerten. BAUSUBSTANZ Thema, Bd. 3. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2023

8.4 Datenbank

[53] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.) Internet-Datenbank MASEA – Materialdatensammlung für die energetische Sanierung. Online verfügbar unter: https://www.masea-ensan.com (abgerufen am 13.08.2026)

A Anlage A

A.1 Problemorientierte Verfahrensauswahl und Hierarchisierung der Untersuchungsverfahren

Die folgende Übersicht dient als schneller Einstieg in die Mauerwerksdiagnostik. Ausgangspunkt ist nicht das einzelne Prüfverfahren, sondern das beobachtete Problem oder das Untersuchungsziel. Die Verfahren werden stufenweise eingesetzt: zunächst einfache, überwiegend zerstörungsfreie Basisuntersuchungen, anschließend gezielte Vertiefungen und erst bei weiterem Klärungsbedarf Fach- oder Laboruntersuchungen. Die Auswahl der Verfahren und die Bewertung ist objektspezifisch durch fachkundige Personen vorzunehmen.

Hinweise zur Anwendung der Tabelle: Die Tabelle richtet sich an Personen ohne vertiefte Kenntnisse der Mauerwerksdiagnostik. Sie ersetzt keine objektspezifische Untersuchungsplanung und enthält keine pauschalen Entscheidungsempfehlungen, da historische Mauerwerke nach Aufgabenstellung, Bauweise, Zustand und Eingriffstiefe unterschiedlich untersucht und bewertet werden müssen. Die in der Tabelle aufgeführten Ziffern verweisen auf die entsprechenden Abschnitte dieses Merkblatts, in denen die jeweiligen Untersuchungsverfahren erläutert werden.

Stufe	Ziel	Regel
1 Basisuntersuchung	Problem eingrenzen und Befund dokumentieren	Immer beginnen mit Sichtprüfung, Fotodokumentation, Kartierung und einfachen Handprüfungen.
2 Vertiefung	Ausdehnung, Tiefe oder Ursache klären	Gezielt zerstörungsarme Messungen, Sondierungen oder Probenahmen einsetzen.
3 Spezialuntersuchung	Kennwerte belastbar bestimmen	Nur bei begründetem Bedarf, Laborprüfung, spezielle Messtechnik erforderlich.

Beobachtetes Problem/ Untersuchungsziel	1 Basisuntersuchung	2 Vertiefung	3 Spezialuntersuchung
Unbekannter Aufbau, Schalen oder Hohlräume	Bestandsunterlagen auswerten; Sichtprüfung; Geometrie, Verband und sichtbare Materialien aufnehmen. 2; 3.1; 3.2; 3.3; 3.4	Sondierungsbohrungen, Endoskopie oder gezielte Bauteilöffnung; ergänzend Thermografie oder Bauradar. 3.1; 3.3; 3.5	Repräsentative Öffnungen und Probenahmen; Aufbau und Materialanteile fachlich bewerten. 3.3; 4.4.3

Freiexemplar

Beobachtetes Problem/ Untersuchungsziel	1 Basisuntersuchung	2 Vertiefung	3 Spezialuntersuchung
Risse, Verformungen oder Hinweise auf Tragfähigkeitsprobleme	Rissverlauf, -breite, -länge, Versatz und Verformungen messen, fotografieren und kartieren; vorhandene Dokumentation vergleichen. 2; 3.1; 3.5	Rissmonitoring, Rissaufnehmer, Bohrkern oder lokale Öffnung bei Bedarf. 3.5	Stein-, Mörtel- und Mauerwerkskennwerte bestimmen; statische Bewertung, gegebenenfalls Flat-Jack- oder Belastungsversuch. 4.4.1; 4.4.2; 4.4.3
Tragfähigkeitsnachweis	Bestandsunterlagen auswerten; Bauteilgeometrie einschließlich Verformungen, Mauerwerksaufbau, Verband, Fugendicken, sichtbare Schäden und Einbaulage der Baustoffe erfassen. 2; 3.1; 3.3; 3.4; 4.1	Repräsentative Probenahme; Rohdichte sowie Druckfestigkeit von Stein, Mörtel und Mauerwerk bestimmen, dabei die Anisotropie berücksichtigen. 2.3; 4.1; 4.2; 4.3; 4.4.1	Zug-, Biegezug- und Schubfestigkeiten rechnerisch oder experimentell ableiten; Elastizitätsmodul abschätzen beziehungsweise in Ausnahmefällen durch In-situ- oder Belastungsversuche bestimmen. 4.4.2; 4.4.3
Lockere Oberfläche, Absanden, Abmehlen, Hohlstellen oder Schalenbildung	Sicht- und Tastprüfung, Abklopfen, Klangprüfung, Kratz- oder Ritzprüfung; Schadensflächen kartieren. 2; 3.2; 3.5; 7.1.2	Endoskopie, Sondierungsbohrung oder Bauteilöffnung; bei größeren Flächen Bauradar. 3.3; 3.5; 7.3.2; 7.3.3	Mikroskopische Gefügeanalyse, Materialuntersuchungen. 7.1.1; 7.1.3; 7.3.4; 7.3.5
Verformungen oder Schäden durch Temperatur-, Feuchte- oder chemisch bedingte Dehnungen	Schadensbild, Verformungen, Risse, Materialwechsel und klimatische beziehungsweise feuchtebedingte Einwirkungen erfassen und dokumentieren. 2; 3.1; 3.5	Zeitliche Entwicklung beobachten; Temperatur- und Feuchteverhältnisse untersuchen; unterschiedliche Dehnungseigenschaften von Stein und Mörtel berücksichtigen. 4.4.4; 6.1.1; 6.1.6	Thermische, hygrische oder chemische Dehnungen und Randbedingungen bewerten; Spannungs- und Verformungsnachweis durchführen. 4.4.4
Feuchteflecken, Durchfeuchtung	Bestandsunterlagen auswerten; Feuchte- und Schadensbild durch Sichtprüfung erfassen und kartieren; Bauteilaufbau, Schichtdicken, mögliche Feuchtequellen sowie klimatische Randbedingungen aufnehmen. Zerstörungsfreie Feuchtemessungen nur orientierend einsetzen. 2; 3.1; 3.3; 3.5; 6.1.1	Bevorzugt Bohrkernproben aus Höhen- und Tiefenprofilen entnehmen; Feuchte- bzw. Wassergehalt, freien Wassergehalt oder Sättigungsfeuchte und den Durchfeuchtungsgrad bestimmen. Stein und Mörtel getrennt bewerten. 2.3; 6.1.1; 6.1.2; 6.1.3; 6.1.6	Hygroskopischen Feuchtegehalt und hygroskopischen Durchfeuchtungsgrad bestimmen; Feuchteverteilung sowie Stein- und Mörtelproben getrennt bewerten und die Ursache der Durchfeuchtung ableiten. 6.1.3; 6.1.4; 6.1.5; 6.1.6

Freiexemplar

Beobachtetes Problem/ Untersuchungsziel	1 Basisuntersuchung	2 Vertiefung	3 Spezialuntersuchung
Ausblühungen, Krusten oder Verdacht auf Salzbelastung	Bestandsunterlagen auswerten; Sichtprüfung und Kartierung; Materialart, Feuchte, Raumklima und Verdunstungszonen dokumentieren. 2; 3.2; 3.5; 7.1.2	Schnelltests oder Leitfähigkeitsmessung an getrennten Stein- und Mörtelproben; Proben aus Höhen- und Tiefenprofilen. 6.1.6; 7.3.1; 7.3.2; 7.3.3	Quantitative Ionenanalyse; bei kristallinen Ausblühungen Röntgendiffraktometrie; Bewertung mit Feuchte- und Klimadaten. 7.3.4; 7.3.5; 7.3.6
Unbekannte Stein- oder Mörtelzusammensetzung	Visuelle und haptische Beurteilung; Farbe, Körnung, Bindemittel, Steinart und Reparaturen aufnehmen; einfache Klopf-, Ritz- und Benetzungsversuche. 2; 7.1.1; 7.1.2	Gezielte Probenahme; einfache chemische Vorprüfungen. 2.3; 7.1.1; 7.1.2	XRD, RFA, REM, TGA/ DTA, Infrarotspektroskopie, Kernspinresonanzspektroskopie (Solid-State NMR, Solution NMR) oder nasschemische Analyse entsprechend der konkreten Fragestellung. Auflicht- oder Dünnschliffmikroskopie. 7.1.3; 7.2
Hygrothermischer Nachweis	Bauteilgeometrie, Mauerwerksaufbau, Schichtdicken und Feuchtezustand erfassen; wärme- und feuchtetechnische Kennwerte zunächst fachlich begründet abschätzen und Parameterstudien vorsehen. 2; 3.1; 3.3; 5.1	Trockenrohdichte bestimmen; Wärmeleitfähigkeit in grober Näherung über die in situ gemessene Wärmestromdichte mithilfe von Wärmeflussmessplatten ermitteln; Wasseraufnahmekoeffizienten des Verbundsystems mittels Franke-Prüfplatte oder WAM-Gerät näherungsweise bestimmen. 5.1; 5.3; 5.5; 5.7	Bei erforderlicher Genauigkeit spezifische Wärmekapazität trocken, Trockenrohdichte, offene Porosität, Wärmeleitfähigkeit trocken, Wasserdampfdurchlässigkeit, kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten sowie Sorptionskurven bzw. -isothermen im Labor bestimmen; Materialstreuungen durch statistisch auswertbare Untersuchungen berücksichtigen. 5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8
Frost- oder Brandschaden	Schadensbild, Exposition und Vergleichsbereiche dokumentieren; Risse, Abplatzungen, Verfärbungen und Gefügeänderungen erfassen. 2; 3.2; 3.5; 6.2; 7.4	Bei Brand Impulslaufzeitmessung; bei Frost Referenzparameter oder Porenstruktur untersuchen; geschädigte und ungeschädigte Bereiche vergleichen. 5.4; 6.2; 7.4	Rohdichte, Druckfestigkeit und gegebenenfalls Frostwiderstand im Labor bestimmen; Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit fachlich bewerten. 4.3; 4.4.1; 6.2; 7.4

Freiexemplar