

Stand der Technik zur Messung der Feuchtigkeit in porösen, mineralischen Baustoffen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades einer

DIPLOMINGENIEURIN

Eingereicht am
*Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener TVFA*

Betreuer:

*Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Maydl
Dipl.-Ing. Matthias Lenz*

Eingereicht von:

Nicole Komoraus

Graz, 13. April 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 13. April 2010

Nicole Komoraus

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am 13. April 2010

Nicole Komoraus

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Maydl, Leiter des Institutes für Materialprüfung und Baustofftechnologie, für die umfassende Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit bedanken.

Weiters bedanke ich mich auch bei meinen betreuenden Universitätsassistenten Dipl.-Ing. Matthias Lenz und Dipl.-Ing. Danilo Schulter für deren Hilfe beim Verfassen der Masterarbeit. Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Institutes für die kollegiale Unterstützung sowie für die zur Verfügungstellung der Räumlichkeiten und Lernbehelfe am Institut.

Besonders bedanken möchte ich mich noch bei meinen Eltern, die mir während meiner ganzen Studienzeit zur Seite standen und mich auch finanziell unterstützt haben. Danke auch all jenen, die mich in dieser Zeit ebenfalls begleitet haben.

Graz, am 13. April 2010

Nicole Komoraus

Kurzfassung

Diese Arbeit dient als „Stand der Technik“-Erhebung für die Firma Arcon Bauwerkssicherheit GmbH, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der Technischen Universität Graz, ein neues System zur Ermittlung der Feuchtigkeit an Betonbauwerken entwickeln will. Anlass ist die zunehmende Bedeutung zur Instandsetzung von Bauwerken. Ziel der Arbeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen marktrelevanter Überwachungssysteme zur Feuchtemessung darzustellen.

Am Beginn der Arbeit werden die Transportmechanismen von porösen, mineralischen Baustoffen erläutert. Im Speziellen werden der Einfluss der Porenstruktur von mineralischen Bauprodukten sowie der Einfluss des Wassers näher betrachtet. Anschließend werden die Ergebnisse bezüglich der Messverfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in tabellarischer Form zusammengefasst. Des Weiteren wird eine Übersicht über marktrelevante Messgeräte in Form einer Checkliste mit praxisbezogenen Auswahlkriterien (wie z.B.: Messbereich, Eindringtiefe, Kosten) gegeben, wodurch die Auswahl eines geeigneten Messgerätes für eine bestimmte Feuchteuntersuchung ermöglicht wird. Abschließend wird noch auf Schadenshäufigkeit und -ausmaß durch Feuchte an Bauteilen in Österreich eingegangen. Anhand von Statistiken werden relevante Schadensbereiche und Schadensursachen identifiziert. In tabellarischer Form werden Schadensbilder, Ursachen und einsetzbare Messgeräten aufgelistet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit geben Aufschluss über die Vor- und Nachteile verschiedenster Messverfahren. Diese Kenntnisse bilden eine solide Wissensbasis und sollen als Grundlage zur Entwicklung eines neuen Monitoring-Systems dienen.

Abstract

This thesis should be a preliminary study for Arcon Bauwerkssicherheit GmbH. In cooperation with the Institute of Technology and Testing of Building Materials at Graz University of Technology, Arcon wants to develop a system for moisture tests for concrete buildings. The reason for this project is the trend that construction maintenance is gaining more and more importance. The aim of this research is to show the possibilities and constraints of systems for measuring moisture that are currently available.

Firstly, the transport of moisture in porous, mineral construction materials will be explained. The focus will especially be on the effect of the pore structure of mineral construction materials as well as the characteristics of water. Subsequently the results concerning the various measuring methods for the determination of moisture will be displayed on a table. Furthermore, an overview of measuring instruments available on the market is given, in terms of a checklist with practically oriented criteria (e.g.: metering capacity, depth of indentation, costs), which will facilitate the choice for an adequate measuring instrument. Finally, the damage frequency and measure of damages in Austria caused by moisture will be discussed in more detail. On the basis of statistics, relevant regions and causes of damages will be listed. The failure mode will be summarized in a table with possible causes and applicable instruments.

The results of this thesis inform about the advantages and disadvantages of various measuring methods. This knowledge forms a solid basis for the development of a new innovative monitoring system.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	13
Glossar	15
1 Einleitung	17
1.1 Hintergrund und Anlass	17
1.2 Zielsetzung	17
1.3 Vorgangsweise	18
2 „Stand der Technik“ - Erhebung	21
2.1 Grundlagen der Transportmechanismen in porösen, mineralischen Baustoffen .	21
2.1.1 Einfluss der Poren auf Transportvorgänge	22
2.1.2 Transportvorgänge in porösen Baustoffen	26
2.1.3 Bindungsmechanismen von Wasser	29
2.1.4 Zusammenfassung	31
2.2 Feuchtigkeitsbezogene Baustoffkennwerte	32
2.2.1 Allgemein gültige Baustoffkennwerte	32
2.2.2 Baustoffkennwerte von Beton	34
2.2.3 Baustoffkennwerte von Mauerwerk	34
2.2.4 Zusammenfassung	36
2.3 Messeffekte und -methoden zur Feuchtigkeitsbestimmung	36
2.3.1 Direkte Messmethoden	36
2.3.2 Indirekte Messmethoden	40
2.3.3 Feuchtigkeitsgehalt und Feuchtigkeitsverteilung	47
2.3.4 Zusammenfassung	48

3	Geräte und Verfahren für Feuchtemessungen	49
3.1	Zerstörende Feuchtigkeitsmessverfahren	52
3.1.1	Trockenschrankverfahren	52
3.1.2	Calciumcarbid-Verfahren	53
3.2	Zerstörungsarme und zerstörungsfreie Feuchtigkeitsmessverfahren	54
3.2.1	Leitfähigkeitsmessverfahren	54
3.2.2	Multiring-Elektrode	55
3.2.3	Kapazitives Verfahren	56
3.2.4	MEMS	57
3.2.5	Mikrowellenmessverfahren	58
3.2.6	Time-Domain Reflektometrie	59
3.2.7	Impuls-Radar-Verfahren	60
3.2.8	Kernspinresonanz-Verfahren	61
3.2.9	Neutronenstrahlungs-Verfahren	62
3.2.10	Gamma-Strahlungs-Verfahren	63
3.2.11	Infrarotemissions-Verfahren	64
3.2.12	Infrarotreflexions-Verfahren	65
3.2.13	Faseroptische Feuchtesensoren	66
3.2.14	Wärmeleitfähigkeits-Verfahren	67
3.3	Vergleichende Bewertung	68
3.4	Checkliste zur Auswahl geeigneter Messgeräte und Messverfahren	69
3.4.1	Aufwand	70
3.4.2	Ausführung	70
3.4.3	Überwachung	70
3.4.4	Mobilität	70
3.4.5	Prüfverfahren	71
3.4.6	Messbereich	71
3.4.7	Messgenauigkeit	71
3.4.8	Eindringtiefe	71
3.4.9	Kosten	72
3.5	Zusammenfassung	75

4 Schadenshäufigkeit und -ausmaß	77
4.1 Schadensbetroffene Bauteile	77
4.1.1 Schadensbilder und deren mögliche Ursachen	79
4.1.2 Ablaufschema zur Auswahl der Messgeräte	84
4.2 Schadensursachen	85
4.3 Zeitpunkt der Schadenseintritte	88
4.4 Kosten im Bauwesen	89
4.5 Zusammenfassung	91
5 Zusammenfassung und Ausblick	93
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	99
Literaturverzeichnis	101

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
€	Euro
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
g	Gramm
GHz	Gigahertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde
k.A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
M%	Masseprozent
m	Meter
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
nm	Nanometer
s	Sekunde
W	Watt
z.B.	zum Beispiel
µm	Mikrometer

Glossar

Baumangel	Baumangel wird laut [45] folgendermaßen zitiert: <i>„Ein Baumangel ist eine Bauwerksbeeinträchtigung als Folge einer Verletzung von Vertragspflichten.“</i>
Bauschaden	Als Schaden werden alle negativen Veränderungen an einem Gebäude oder Bauteil bezeichnet, die aufgrund von Fehlern bzw. nicht vermeidbaren Einflüssen entstanden sind. [46]
Bruttoinlandsprodukt	Bruttoinlandsprodukt wird laut [83] folgendermaßen zitiert: <i>„Das Bruttoinlandsprodukt gibt den Gesamtwert aller Güter an, die innerhalb eines Jahres innerhalb der Landesgrenzen einer Volkswirtschaft hergestellt wurden und dem Endverbrauch dienen.“</i>
Dielektrikum	Jede Substanz, die elektrisch schwach, nichtleitend oder nichtmetallisch ist. Es kann ein Gas, eine Flüssigkeit oder auch ein Feststoff sein. [84]
Dielektrizitätskonstante	Die Konstante definiert die dielektrische Leifähigkeit, welche die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder angibt. [85]
Effusion	In sehr feinen Poren eines Feststoffes wird die Diffusion als Effusion bezeichnet. Die Wassermoleküle stoßen öfters gegen die Porenwandungen als aufeinander. [13]
Exsikkator	Ein chemisches Laborgerät zur Trocknung, das luftdicht verschlossen werden kann. [86]
Hydratation	Eine chemische Reaktion des Zementes mit Wasser. Bei dem Vorgang kommt es zur Anlagerung von Wasser an eine chemische Bindung unter Bildung eines Hydrates. [28]
Kapazität	Die physikalische Größe beschreibt die Fähigkeit, elektrische Ladungen aufnehmen und speichern zu können. Die Kapazität ist das Verhältnis einer Ladungsmenge zur angelegten Spannung. [87]
Koaxialkabel	Ein zweipoliges Kabel mit konzentrischem Aufbau zur Übertragung von breitbandigen Signalen. [88]

Kondensator	Ein Bauelement mit der Fähigkeit, elektrische Ladungen speichern zu können. [89]
Logger	Logger wird laut [90] folgendermaßen zitiert: „ <i>Ein Messgerät, welches physikalische Messdaten über eine bestimmte Zeit hinweg erfassen kann.</i> “
Messmethode	Die Messmethode ist eine spezielle, vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung. [82]
Messprinzip	Das Messprinzip ist die wissenschaftliche Grundlage eines Messverfahrens bzw. die physikalische Grundlage der Messung. [82]
Messverfahren	Das Messverfahren ist die praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode. [82]
Oszilloskop	Ein elektronisches Messgerät zur optischen Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer oder mehrerer Spannungen. [91]
Polymermatrix	Eine chemische Verbindung aus Ketten- oder verzweigten Molekülen. [92]
Reflektometer	Reflektometer wird laut [93] folgendermaßen zitiert: „ <i>Ein Gerät zur zerstörungsfreien Messung von Reflexionen und zur Lauflängenmessung.</i> “
Solvatochromer Farbstoff	Ein Farbstoff, der seine Farbe in Abhängigkeit von der Beschaffenheit eines Lösungsmittels ändert. [56]
Spektrometer	Spektrometer wird laut [94] folgendermaßen zitiert: „ <i>Ein Gerät zur Darstellung eines Spektrums.</i> “

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Anlass

Die Firma Arcon Bauwerkssicherheit GmbH beabsichtigt in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Graz, im Speziellen mit dem Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, ein neues System zur Feuchtigkeitsüberwachung bei Betonbauwerken zu entwickeln. Anlass zu diesem Schritt gab die Tatsache, dass viele Schäden aufgrund von Feuchtigkeit im Bauteil hervorgerufen werden. Außerdem nimmt die Bedeutung zur Dauerhaftigkeit von Bauwerken immer mehr zu, was nur durch regelmäßige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten erreicht werden kann.

Bis dato gibt es kaum effiziente Methoden, wie der Feuchtegehalt im Inneren eines Baustoffes kontinuierlich überprüft werden kann. Mit dem neuen Überwachungssystem soll daher durch Überprüfung bestimmter Eigenschaftszustände eine permanente Kontrolle möglich gemacht werden. Durch regelmäßiges Aufzeichnen der Messwerte sollen Schäden frühzeitig erkannt werden, wodurch rechtzeitig geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von größeren Schäden getroffen werden können.

Zu Beginn ist es notwendig, eine Recherche über den aktuellen Stand der Technik bezüglich Feuchtemessverfahren zu erstellen. Damit alle Beteiligten einen Überblick bekommen und den gleichen Wissensstand haben, soll diese Arbeit als Vorstudie für das Projekt dienen.

1.2 Zielsetzung

Ziel ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der marktrelevanten Systeme zur Feuchtemessung darzustellen. Die einzelnen Messgeräte und -verfahren sollen dabei näher beschrieben und in einer Checkliste zusammengefasst werden. Dies soll der TU Graz und der Firma Arcon Bauwerkssicherheit GmbH helfen, eine Übersicht zu erhalten.

Außerdem werden auch die Schadensfälle, welche in Zusammenhang mit Feuchtigkeit auftreten, genauer betrachtet und nach den verschiedenen Bauteilgruppen untergliedert. Dies soll als Entscheidungshilfe dienen, in welchen Bereichen eine Feuchtigkeitsüberwachung von Bedeutung wäre.

1.3 Vorgangsweise

Die Arbeit lässt sich in fünf Arbeitspakete untergliedern:

Arbeitspaket 1, Grundlagen:

- Einfluss der Poren auf Transportvorgänge;
- Transportvorgänge in porösen Baustoffen;
- Bindungsmechanismen von Wasser;
- Feuchtigkeitsbezogene Baustoffkennwerte.

Dieses Arbeitspaket wird in den Kapiteln 2.1 und 2.2 bearbeitet. Dabei werden die Eigenschaften der Poren näher beschrieben, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Transportvorgänge in porösen, mineralischen Baustoffen haben. Danach folgt eine Übersicht über Transportvorgänge und eine Beschreibung der Eigenschaften des Wassers, um zu verstehen, wie Feuchte überhaupt in einen Bauteil eindringen kann. Ebenso zu den Grundlagen gehören die Erläuterungen der einzelnen feuchtebezogenen Baustoffkennwerte.

Arbeitspaket 2, Messmethoden zur Feuchtigkeitsbestimmung:

- Direkte Messmethoden;
- Indirekte Messmethoden;
- Feuchtigkeitsgehalt und Feuchtigkeitsverteilung.

Im zweiten Arbeitspaket werden die möglichen Messverfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in einem Baustoff näher erklärt. Dabei werden die Messmethoden in direkte und indirekte Methoden unterteilt. Anschließend erfolgt eine Einteilung der Messmethoden, ob sie für die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes oder einer Feuchtigkeitsverteilung geeignet sind.

Arbeitspaket 3, marktrelevante Messsysteme:

- Zerstörende Messverfahren;
- Zerstörungsarme bzw. zerstörungsfreie Messverfahren;
- Vergleichende Bewertung
- Checkliste.

Das Arbeitspaket 3 entspricht dem Kapitel 3. Hier werden die am derzeitigen Markt vorhandenen Messgeräte und -methoden näher beschrieben. Dabei sind bestimmte Anhaltspunkte, wie zum Beispiel die Kosten oder die Messtiefe, festgelegt, wodurch ein einfacher Vergleich von einzelnen Messverfahren miteinander möglich ist. Anhand dieser Auflistung lässt sich dann eine Checkliste erstellen. Den Benutzern wird dadurch die Suche nach einem geeigneten Gerät für eine bestimmte Problemstellung erleichtert.

Arbeitspaket 4, Schadenshäufigkeit und -ausmaß:

- Schadensbetroffene Bauteile;
- Schadensursachen;
- Zeitpunkt der Schadenseintritte;
- Kosten im Bauwesen.

Dieses Arbeitspaket umfasst Schadensfälle bei Bauwerken, die aufgrund von überhöhter Feuchtigkeit entstanden sind. Die Schäden werden nach Schadensausmaß untergliedert und relevante Bauteile werden identifiziert. Damit soll eine Grundlage bereitgestellt werden, wo ein neues Überwachungssystem der Feuchtigkeit entwickelt werden sollte.

Arbeitspaket 5, Zusammenfassung:

- Schlussfolgerung;
- Bewertung;
- Ausblick.

Im letzten Arbeitspaket wird der Inhalt der Masterarbeit noch einmal in kurzen Worten zusammengefasst und auf die wesentlichen Aspekte hingewiesen. Zudem folgt ein Ausblick über die möglichen Eigenschaften und Anwendungsbereiches eines neuen Überwachungssystemes zur Feuchtigkeitsmessung.

Das Thema umfasst einige spezielle Ausdrücke, die zu Beginn bereits in einem Glossar erläutert wurden. Die Quellenangaben sind in eckigen Klammern ersichtlich, wobei das Literaturverzeichnis nach Literatur- und Internetquellen getrennt ist. Wörtliche Zitate sind durch den Literaturverweis und durch kursive Schrift erkennbar.

Kapitel 2

„Stand der Technik“ - Erhebung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Wissensstand hinsichtlich Feuchtigkeit in porösen, mineralischen Baustoffen erarbeitet. Dabei werden drei wesentliche Themen behandelt:

- Grundlagen der Transportmechanismen in porösen, mineralischen Baustoffen,
- feuchtigkeitsbezogene Baustoffkennwerte und
- Messeffekte und -methoden zur Feuchtigkeitsbestimmung.

2.1 Grundlagen der Transportmechanismen in porösen, mineralischen Baustoffen

Im Rahmen dieses Kapitels sollen die verschiedenen Transportvorgänge, welche in den porösen, mineralischen Baustoffen stattfinden, näher erläutert werden. Dabei wird auf die Einflussgrößen der Transportvorgänge eingegangen und auch auf die Kenngrößen von porösen Baustoffen. Es werden vor allem der Einfluss der Porenstruktur von mineralischen Bauprodukten sowie die Eigenschaften des Wassers näher erläutert.

An einem Bauwerk kann es zu verschiedenen Beanspruchungen durch Wasser oder Feuchtigkeit kommen. Dabei werden laut [26] folgende Kategorien unterschieden:

- **Baufeuchte:** Einige Baustoffe werden mit Wasser hergestellt, dies muss feuchtetechnisch berücksichtigt werden.
- **Bodenfeuchte:** Bauteile, die an das Erdreich grenzen, können dessen Feuchtigkeit aufnehmen.
- **Niederschläge:** Bauwerke werden z.B.: durch Regen, Schnee oder Hagel beansprucht.
- **Wohnfeuchte:** Menschen und Pflanzen produzieren Feuchtigkeit, die an die Raumluft abgegeben wird.

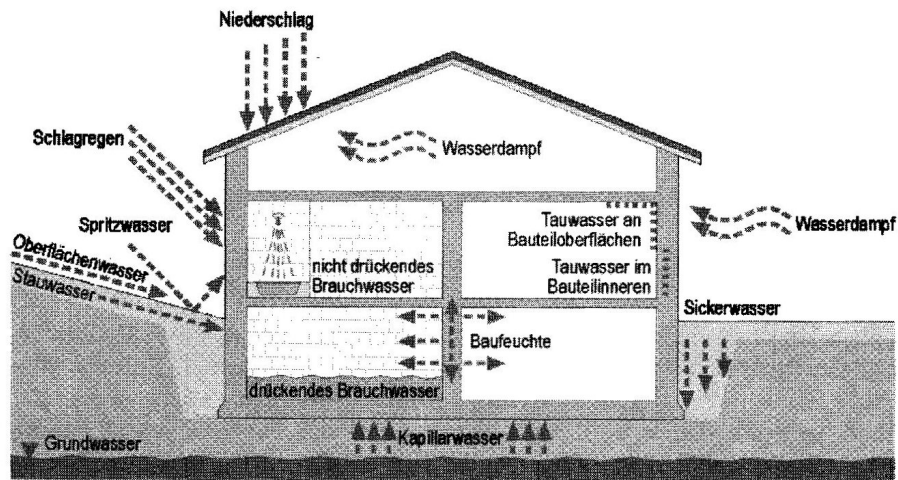


Abbildung 2.1: Beanspruchungen durch Wasser auf Bauwerke [13]

2.1.1 Einfluss der Poren auf Transportvorgänge

Die Porigkeit eines Baustoffes wird durch das vorhandene Porenvolumen, die Porengrößenverteilung und die Porengeometrie bestimmt [52]. Die Poren sind verantwortlich für die Wasseraufnahme, welche laut [49] folgende Auswirkungen hervorrufen kann:

- Verminderung der Festigkeit,
- Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit,
- Korrosion an Metallen sowie
- Entstehung von Sprengwirkung.

2.1.1.1 Porenvolumen

Der Anteil der Poren und der Haufwerkshohlräume eines Stoffes wird Porosität genannt. Sie gibt Auskunft über das Verhalten des Baustoffes gegenüber Flüssigkeiten und Gasen. Ermitteln lassen sich der Porenanteil und der Haufwerkshohlraum anhand der Reindichte, Rohdichte und der Schüttdichte. Wobei die Schüttdichte die Trockenmasse eines Stoffes bezogen auf das in einem Messgefäß ermittelte Gesamtvolumen ist, d.h. inklusive Haufwerkshohlraum. Die Rohdichte ist die Trockenmasse eines Stoffes bezogen auf dessen Gesamtvolumen, und die Reindichte wird als Trockenmasse eines Stoffes definiert bezogen auf das hohlraumfreie Volumen (siehe Abbildung 2.2, Seite 23). [28]

Die Porosität lässt sich laut [15] in vier Kategorien einteilen:

- **dicht**, ohne oder mit wenig geschlossenen Poren, z.B.: dichter Beton;
- **feinporig**, mit dichten Porenwandungen, z.B.: Ziegel;
- **grobporig**, offene Kapillaren, z.B.: Polystyrol;
- **grob- und feinporig**, die Wandungen der groben Poren sind durch feine Poren unterbrochen, z.B.: Gasbeton.

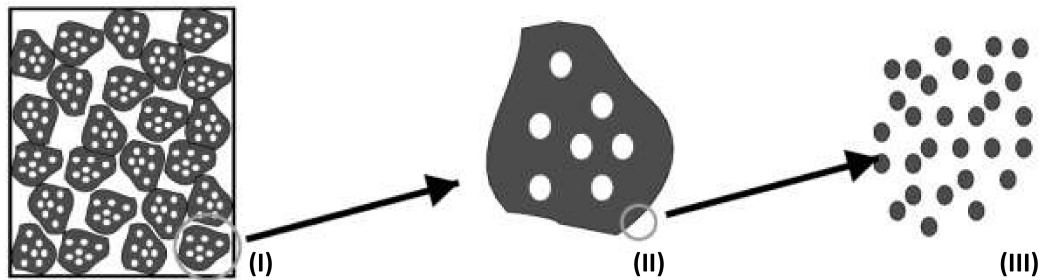


Abbildung 2.2: Schüttdichte (I), Rohdichte (II) und Reindichte (III) [49]

Porenanteil

Der Porenanteil, auch unter den Namen Gesamtporigkeit und Porengehalt bekannt, ist das Verhältnis vom Porenvolumen zum Gesamtvolumen. Zum Porenvolumen werden sowohl die wassergefüllten als auch die luftgefüllten Poren gezählt. [28]

$$P = \frac{\rho_0 - \rho_r}{\rho_0} * 100 \text{ [%]}$$

P = Porenanteil [%]

ρ_0 = Reindichte [g/cm^3]

ρ_r = Rohdichte [g/cm^3]

Haufwerkshohlraum

Der Haufwerkshohlraum ist der Raumanteil der Hohlräume zwischen den Körnern von Körnungen oder Korngemischen, laut [28] und wird ebenfalls in Prozent angegeben.

$$H = \frac{\rho_r - \rho_s}{\rho_r} * 100 \text{ [%]}$$

H = Haufwerkshohlraum [%]

ρ_r = Rohdichte [g/cm^3]

ρ_s = Schüttdichte [g/cm^3]

Bei genauerer Betrachtung eines durchfeuchteten Baustoffes wird das Porenvolumen noch in ein scheinbares und in ein tatsächliches Porenvolumen unterteilt. Das tatsächliche Porenvolumen schließt sowohl offene als auch geschlossene Poren, in die kein Wasser fließen kann, ein. Bei dem scheinbaren Porenvolumen hingegen werden nur die Poren mit einbezogen, welche das Wasser kapillar aufnehmen können. [52]

2.1.1.2 Porengeometrie und Porengröße

Poren können laut [54] nach folgenden Formen, wie auch in Abbildung 2.3 auf Seite 24 ersichtlich, eingeteilt werden:

- geschlossene Poren;
- offene, durchströmbare Poren;
- offene, nicht durchströmbare Poren.

Die engen offenen Poren werden auch als Kapillarporen bezeichnet, die weiten offenen als Gefüge- oder Haufwerksporen und die geschlossenen werden als Zellporen betitelt [48]. Weiters lassen sich die nicht durchströmbaren Poren in Sackporen und in Flaschenhalsporen unterteilen. Wobei die Sackporen, wie schon der Name verrät, eine rundliche Endung bilden und die Flaschenhalsporen länglich auslaufen (siehe Abbildung 2.4, Seite 24). [52]

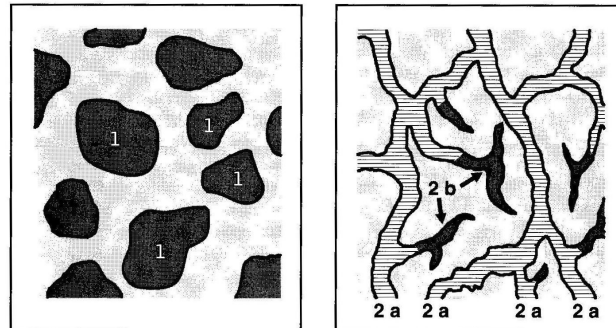


Abbildung 2.3: Geschlossene Poren (1); offene, durchströmbare Poren (2a) und offene, nicht durchströmbare Poren (2b) [54]

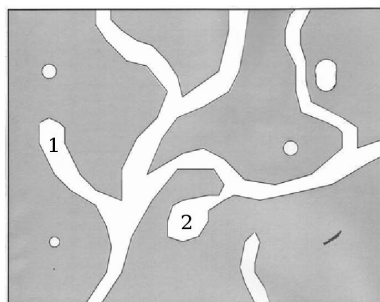


Abbildung 2.4: Flaschenhalsporen (1) und Sackporen (2) [52]

Die Form hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit. So können sich nur die durchgehenden Poren durch kapillare Aufnahme des Wassers füllen. Bei den nicht durchströmbaren Poren kann Wasser nur unter Druck eindringen. Der Grund dafür ist, dass die eingeschlossene Luft in diesen Räumen einen Gegendruck erzeugt. In geschlossenen Poren kann das Wasser überhaupt nur dampfförmig eindringen. Die Kondensation des Dampfes kann aber zu einer teilweisen Befüllung der geschlossenen Zellen führen. [52]

Außerdem unterscheiden sich die Poren laut [52] auch hinsichtlich ihrer Größe:

- $< 10^{-7}$ m \rightarrow Mikroporen oder Gelporen;
- $> 10^{-7}$ m und $< 10^{-4}$ m \rightarrow Makroporen oder Kapillarporen;
- $> 10^{-4}$ m \rightarrow Luftporen.

Eine kapillare Wasseraufnahme kann nur durch die Makroporen erfolgen. Daher werden diese auch als Kapillarporen bezeichnet. Die Mikroporen und Luftporen sind zu klein bzw. zu groß für diesen Prozess. Bei diesen Poren kann aber immer noch Wasserdampf eindringen. [27]

Die Tabelle 2.1, Seite 25 zeigt eine detaillierte Übersicht über Poren im Beton mit Verbindung auf betontechnologische Maßnahmen und Transportmechanismen. Durch die betontechnologischen Maßnahmen kann die Porengrößenverteilung von einem Betontechnologen sehr gut mitbestimmt werden. Die Anzahl der Gelporen ist nämlich abhängig von dem verwendeten Bindemittel und dem Hydratationsvorgang, während die Anzahl der Kapillarporen vom Überschusswasser bestimmt wird. [51]

Tabelle 2.1: Einteilung der Poren nach [4] und [14] verändert

Porenradius	Poreneinteilung		Transport	Betontechnologische Maßnahmen
> 2 mm	Verdichtungsporen	Grobporen		Verdichten
50 µm - 2 mm	Luftporen	Makrokapillaren	drückendes Wasser	Luftporenbildner
2 µm - 50 µm	Kapillarporen	Kapillaren	wassersaugend	w/z-Wert
50 nm - 2 µm		Mikrokapillaren	undurchlässig für Druckwasser	
2 nm - 50 nm	Gelporen	Mesoporen	undurchlässig	Hydratation und Zementart
< 2 nm		Mikroporen		

In der folgenden Abbildung (Abbildung 2.5, Seite 25) ist neben der Porenverteilung von Beton auch die Porenverteilung von Ziegel und Sandstein ersichtlich.

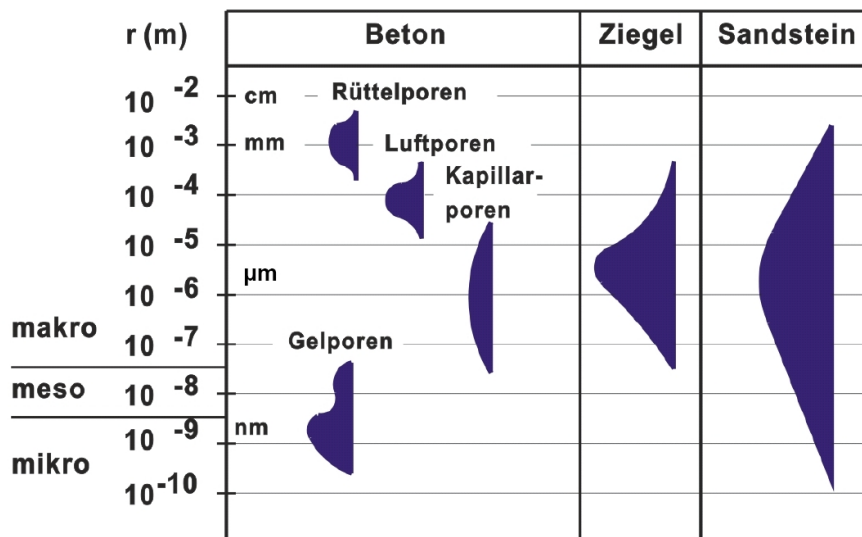


Abbildung 2.5: Porenverteilung von Beton, Ziegel und Sandstein [49]

2.1.1.3 Quecksilberdruckporosimetrie

Das chemische Zeichen für Quecksilber ist Hg, deshalb wird dieses Verfahren auch Hg-Porosimetrie genannt. Es dient zur **Bestimmung der Porengrößenverteilung**. Das Prinzip des Messverfahrens beruht auf den Kapillarkräften. Als nicht benetzende Flüssigkeit wird, wie der Name schon verrät, Quecksilber verwendet. [54]

Das Verfahren geschieht unter Vakuum, um einen Gegendruck der eingeschlossenen Luft zu vermeiden. Durch einen externen Druck, der gegen die Oberflächenspannung der Flüssigkeit wirkt, gelangt das Quecksilber in den Baustoff. Dabei wird die Menge der Flüssigkeit, die bei einer bestimmten Druckstufe eindringt, aufgezeichnet. Unter Annahme von zylinderförmigen Poren und mit der Washburn-Gleichung können in Abhängigkeit der gemessenen Drücke

die entsprechenden Porenradien berechnet werden. Dadurch kann auch eine Größenverteilung erstellt werden. [54]

Wegen dem Druckbereich bis zu 2.000 bar der Messapparaturen kann aber nur ein Porenradienbereich von 2 nm und 200 µm erfasst werden. Neben dem Ergebnis der Porengrößenverteilung lassen sich auch Angaben zur Reindichte, Rohdichte, offenen Porigkeit und zur inneren Oberfläche erstellen. [54]

2.1.2 Transportvorgänge in porösen Baustoffen

Bei porösen, mineralischen Baustoffen kommt es zu einem Feuchtetransport, wenn der Bauteil im Vergleich zur Umgebung einen anderen Feuchtezustand aufweist [24]. Je nachdem in welche Richtung der Feuchtestrom wirkt, wird laut [24] in folgende Bereiche unterschieden:

- Desorption = Wasserabgabe;
- Diffusion = Wassertransport;
- Sorption = Wasseraufnahme.

Als Permeation wird der dreistufige Vorgang bezeichnet, bestehend aus der Sorption, Diffusion und der Desorption. Bei Kontakt eines porösen Feststoffes mit flüssigem Wasser wird das Wasser zuerst an der Oberfläche des Feststoffes aufgenommen. Danach werden die einzelnen Moleküle in das Material transportiert. Kommt es dann zu einer Veränderung der Umgebungstemperaturen, verdampft das Wasser und wird wieder an die Umgebung abgegeben. Im flüssigen Zustand erfolgt der Transport durch Kapillarkräfte, laminarer Strömung oder zufolge der Konzentrationsunterschiede. Das Wasser kann auch im dampfförmigen Zustand vorkommen. In diesem Fall erfolgt der Transport als Wasserdampfdiffusion oder als Effusion. [24]

Die folgende Abbildung (Abbildung 2.6, Seite 26) gibt einen Überblick über die Transportmechanismen von Wasser in porösen, mineralischen Baustoffen.

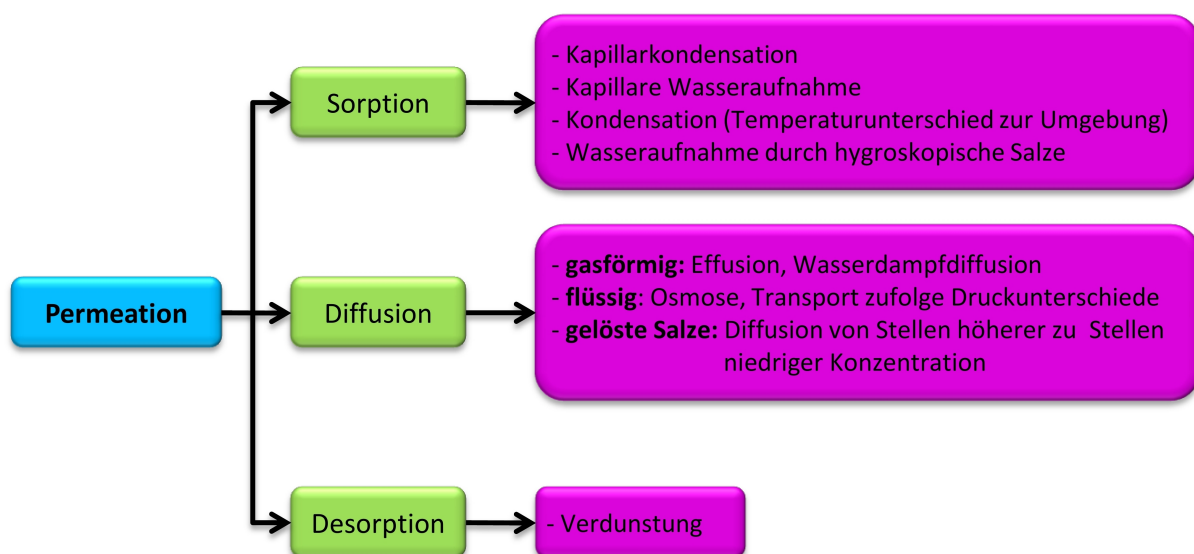


Abbildung 2.6: Übersicht über Transportmechanismen

Folgende für das Bauwesen relevanten Transportmechanismen werden auf den nachfolgenden Seiten näher beschrieben:

- Sorption (Adsorption / Desorption);
- Kapillarkondensation;
- Kapillare Wasseraufnahme;
- Diffusion;
- Wasserdampfdiffusion;
- Effusion und
- Osmose.

Weiters ist noch zu erwähnen, dass die Feuchtespeicherung von porösen, mineralischen Baustoffen von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt und daher in drei Bereiche (hygroskopischer, ungesättigter und gesättigter Bereich) gegliedert wird [47]. In der Abbildung 2.7, Seite 27 ist eine Übersicht über die Wechselwirkung zwischen Bauprodukt und Wasser ersichtlich.

Feuchtebereich	hygroskopischer Bereich	ungesättigter Bereich	gesättigter Bereich
Feuchte-transport	Wasserdampfdiffusion	ungesättigte Porenwasserströmung	Wasserströmung
Feuchteinwirkung und betroffene Baustoffe	nur Luftfeuchte → Innenraumbaustoffe	Wasserkontakt, Wasserlagerung → Aussenbaustoffe	
	Luftfeuchte mit Kondensat → Innenraum- und Wandbaustoffe		
	Luftfeuchte, Kondensat, Wasserkontakt → Innen- und Aussenbaustoffe		
	niedrige rel. Luftfeuchtigkeit	hohe rel. Luftfeuchtigkeit	wassergesättigt

Abbildung 2.7: Übersicht über die Wechselwirkung zwischen Bauprodukt und Wasser nach [47] verändert

2.1.2.1 Sorption und Desorption

Bei der Sorption wird Wasser aus der umgebenden Luftfeuchte an einen Baustoff angelagert. Dies kann an der Außenseite des Materials geschehen oder auch im Inneren des Bauteils. Die Sorption kann als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur dargestellt

werden und wird dann als Sorptionsisotherm bezeichnet (siehe Abbildung 2.8, Seite 28). Bei porösen Stoffen dienen die Oberflächen der Poren als Anlagerungsebene. [24]

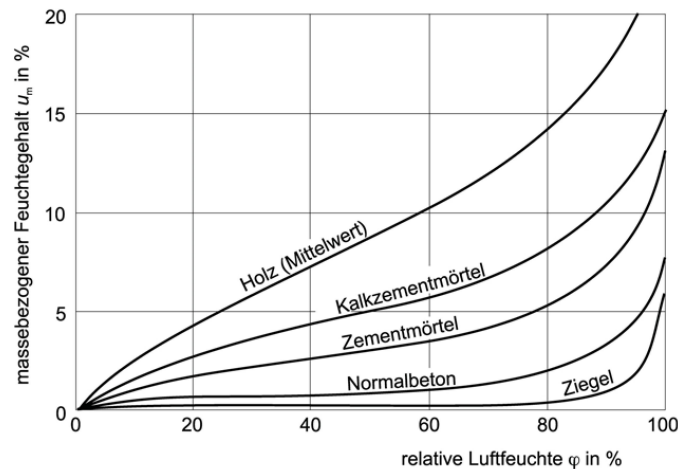


Abbildung 2.8: Sorptionsisotherme für verschiedene Baustoffe [29]

Der Vorgang hängt laut [24] von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Oberfläche des Materials sowie dem Durchmesser der Poren ab. Die Wassermoleküle lagern sich solange an der Oberfläche an, bis ein Gleichgewicht zwischen der Wasseraktivität in der Luftfeuchtigkeit und der Wasseraktivität an der Materialoberfläche vorherrscht. Im Inneren kann es dann zu **Kapillarkondensation** kommen, woraufhin sich die Poren mit Wasser füllen. Den umgekehrten Prozess nennt man Desorption. Dabei wird das Wasser vom Material an die Umgebung abgegeben. [24]

Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme ist die häufigste Art der Wasseraufnahme. Voraussetzung dafür ist, dass die Poren des Baustoffes groß genug sind und der Baustoff direkt mit Wasser in Berührung kommt [52]. Die Flüssigkeitsaufnahme erfolgt durch Aufsaugen des Wassers durch die Kapillarporen des porösen Stoffes [27]. Dabei werden die Innenflächen der Kapillaren mit Wasser benetzt, wodurch die Oberfläche größer wird. Die hohe Oberflächenspannung des Wassers wirkt dieser Vergrößerung aber entgegen und so kommt es, dass das Wasser in den Poren aufsteigt (siehe auch Kapitel 2.1.3.2, Seite 30). [5]

Je kleiner der Kapillarporenradius ist, d.h. je feinporöser der Baustoff ist, desto größer ist die kapillare Steighöhe. Auch bei zunehmender Benetzbarkeit nimmt die Höhe zu. [24]

Diese Wasseraufnahme kann durch Aufbringen eines hydrophobierenden Anstriches auf das poröse Material verringert werden. Denn dieser Anstrich macht die Stoffoberfläche schlechter benetzbar. Dieser Effekt wird im Laufe der Zeit aber immer geringer. [49]

2.1.2.2 Diffusion

Bei der Diffusion kommt es aufgrund von Molekularbewegungen zur Vermischung von Stoffen (Gasen, Flüssigkeiten oder Lösungen), die in unterschiedlicher Konzentration vorherrschen. [52]

Der Feuchtetransport kann laut [62] durch zwei verschiedene Modelle beschrieben werden:

- **Feuchtegradientenmodell = Diffusivitätsmodell:** Der Transport wird in Abhängigkeit des Feuchtegehaltsgradienten beschrieben. Die Feuchtigkeit bewegt sich nämlich von einem Ort mit hoher zu Orten mit geringerer Feuchte. Dieses Modell ist aber nur für den ungesättigten Bereich anwendbar.
- **Kapillardruckmodell = Darcy-Strömungsmodell:** Das Porenmodell wird als Netzwerk zylindrischer Poren modelliert. Durch diese bewegt sich die Flüssigkeit zufolge eines Druckgradienten. Mit diesem Modell lassen sich alle Transportprozesse von Wasser beschreiben.

Wasserdampfdiffusion und Effusion

Dieser Prozess beruht auf der brown'schen Molekularbewegung (=thermische Eigenbewegung) von Teilchen [57]. Dabei bewegen sich die gasförmigen Wassermoleküle in den Poren der Baustoffe von Stellen mit höherer Wasserdampfkonzentration zu Stellen mit geringerer Konzentration, d.h. sie bewegen sich in Richtung des Dampfdruckgefälles [13]. Die Diffusion findet somit von warm nach kalt und von feucht zu trocken statt. [15]

Die diffundierenden Teilchen legen eine zickzackförmige Strecke zurück. Die Knickpunkte entstehen durch Zusammenstöße mit anderen Teilchen oder durch den Aufprall an eine Begrenzung. Es wird von einer Wasserdampfdiffusion gesprochen, wenn die Wassermoleküle öfters auf andere treffen als auf die Porenwandungen. Dies geschieht bei Poren mit einem Durchmesser von mindestens 100 nm. Bei Baustoffen mit sehr kleinen Poren trifft der andere Fall zu. Dieser Vorgang wird dann Effusion genannt (siehe Abbildung 2.9, Seite 29). [13]

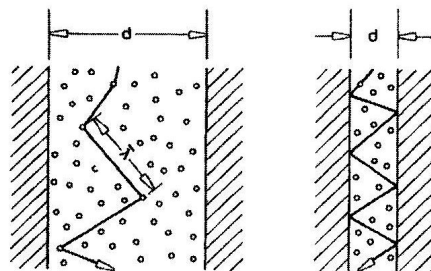


Abbildung 2.9: Wasserdampfdiffusion und Effusion [13]

Osmose

Bei diesem physikalischen Mechanismus tritt Flüssigkeit durch eine halbdurchlässige Wand hindurch. Dabei muss das Wasser auf beiden Seiten der Bauteilfläche Lösungstoffe in unterschiedlichen Konzentration enthalten. Ist dies der Fall, fließt das Wasser von der Seite mit dem geringeren Anteil der Lösung zur Seite mit dem höheren Anteil. Dies hat zur Folge, dass das Verhältnis von Wasser und den Lösungstoffen verändert wird. Der Vorgang ist beendet, sobald die Konzentrationen ausgeglichen sind. [52]

2.1.3 Bindungsmechanismen von Wasser

2.1.3.1 Molekülstruktur und Dipoleigenschaft

Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom, wobei der Sauerstoff mit den beiden Wasserstoffatomen jeweils über eine polare Atombindung verbunden

ist. Die Atome sind gewinkelt angeordnet und schließen einen Bindungswinkel von $104,45^\circ$ ein. [5]

Aufgrund der höheren Elektronegativität des Sauerstoffatoms wird der Seite des Sauerstoffes eine negative Polarität zugewiesen und der des Wassers eine positive. Dadurch bildet sich ein **elektrischer Dipol** aus [5]. Zuzufolge der Eigenschaften des Dipols besitzen die Wassermoleküle ausgeprägte zwischenmolekulare Anziehungskräfte, die zu Wasserstoffbrückenbindungen führen können. Diese besonderen Eigenschaften werden auch als die Anomalie des Wassers bezeichnet. Dazu gehört auch zum Beispiel, dass Wasser einen höheren Schmelz- und Siedepunkt besitzt [59]. Bei homologen Verbindungen (=strukturell eng verwandte Substanzen) steigt normalerweise mit dem Molekulargewicht der Schmelz- und Siedepunkt. Wasser hat aber aufgrund der Wasserstoffbrückenbindungen trotz geringerem Molekulargewicht, zum Beispiel im Gegensatz zu Schwefelwasserstoff, einen höheren Siedepunkt. [28]

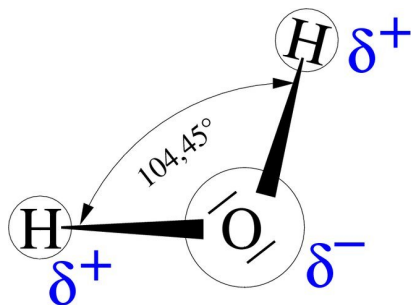


Abbildung 2.10: Wassermolekül [59]

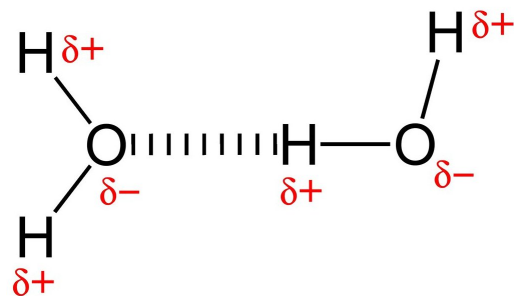


Abbildung 2.11: Wasserstoffbrückenbindung [60]

2.1.3.2 Oberflächenspannungen, Kohäsions- und Adhäsionskräfte

Die zuvor erwähnten zwischenmolekularen Anziehungskräfte werden auch Kohäsionskräfte genannt. Im Inneren der Flüssigkeit heben sich die Kräfte gegenseitig auf. Bei Molekülen, die sich aber an der Oberfläche befinden, werden nur jene Kräfte kompensiert, die ins Innere der Flüssigkeit wirken. Die anderen Kräfte bleiben über und ergeben die sogenannte Oberflächenspannung σ . Sie ist ein Maß für die Energie, die zur Erzeugung neuer Oberflächen benötigt wird. [5]

Aufgrund der Dipoleigenschaften und der Wasserstoffbrückenbindungen ist die Oberflächenspannung des Wassers etwa dreimal so groß wie die von anderen Flüssigkeiten. Nur Quecksilber besitzt eine noch höhere. Außerdem gibt es noch Kräfte zwischen Molekülen einer Flüssigkeit und einer Festkörperoberfläche. Sie werden Adhäsionskräfte genannt. [5]

Bei Wasser sind die Adhäsionskräfte stärker als die Kohäsionskräfte. Die Flüssigkeit strebt an, möglichst viel Materialoberfläche zu benetzen. Es bildet sich daher eine **konkave**, d.h. nach innen gewölbte Oberfläche aus. Ist das Kräfteverhältnis umgekehrt, entsteht eine **konvexe**, nach außen gewölbte Fläche (siehe Abbildung 2.12, Seite 31). Dieser Fall tritt bei der Verwendung von Quecksilber auf. [5]

Natürlich hat auch die Art der Materialoberfläche Einfluss auf die Stärke der Adhäsionskräfte. Die mineralischen Baustoffe haben bei Kontakt mit Wasser sehr große Adhäsionskräfte und ergeben somit eine intensive Benetzung. Sie werden als **hydrophil** (=wasseranziehend) bezeichnet. Ist die Benetzung nur sehr gering, werden die Stoffe **hydrophob** (=wasserabstoßend) genannt. Dies findet zum Beispiel bei Kunststoffen statt (siehe Abbildung 2.13, Seite 31). Das Maß für die Benetzbarkeit ist der sogenannte Rand- oder Kontaktwinkel ϕ . [5]

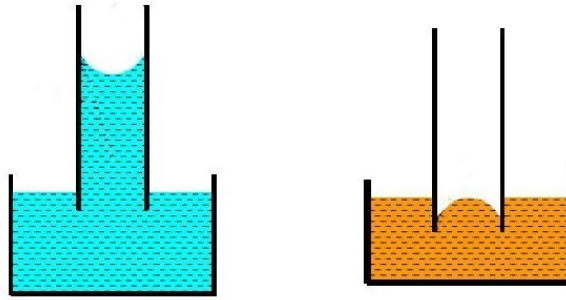


Abbildung 2.12: Konkave und konvexe Fläche [4]

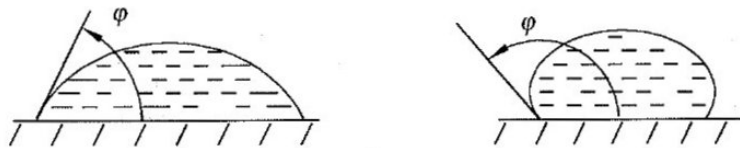


Abbildung 2.13: Hydrophiles und hydrophobes Verhalten [5]

2.1.3.3 Wasseraufnahme und -abgabe

Die Wasseraufnahme von Baustoffen wird als **Quellen** und die Wasserabgabe als **Schwinden** bezeichnet. Dabei kommt es bei einer Austrocknung bzw. Wasseraufnahme des Baustoffes zu einer Volumen- oder Längenänderung. Diese Prozesse sind reversibel. Es könnte nur ein irreversibles Anfangsschwinden auftreten, wenn zum Beispiel ein zementgebundener Bauteil das erste Mal austrocknet. [13]

Bei Beton hängt das Ausmaß des Schwindens vom Volumen und von der Zusammensetzung des Zementsteins ab. Außerdem spielt auch die Größe des Bauteils sowie die Feuchtigkeit der umgebenden Luft eine Rolle [58]. Das Schwinden wird laut [58] in drei Kategorien unterschieden:

- **Frühschwinden** oder **Anfangsschwinden**: erfolgt durch Verdunsten und Austrocknung des Überschusswassers in den ersten paar Tagen, nachdem ein Bauteil betoniert wurde.
- **Chemisches Schwinden**: wird durch den Wasserentzug bei der Hydratation verursacht.
- **Trocknungsschwinden**: geschieht zufolge der Abgabe des chemisch nicht gebundenen Wassers aus den Kapillarporen.

2.1.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen erarbeitet. Dies dient dem Verständnis, wie Feuchte in einen Baustoff eindringen kann und welchen Einfluss dabei die Eigenschaften von Poren und Wasser haben.

2.2 Feuchtigkeitsbezogene Baustoffkennwerte

In diesem Kapitel werden die Baustoffkennwerte näher betrachtet, die im Bezug auf die Feuchtigkeit eine Rolle spielen. Dabei werden zuerst die Kennwerte erläutert, die sowohl für Beton als auch für Mauerwerk und Naturstein gelten. Anschließend folgt eine Beschreibung der materialspezifischen Kennwerte.

2.2.1 Allgemein gültige Baustoffkennwerte

2.2.1.1 Feuchtegehalt

Massebezogener Feuchtegehalt

Der massebezogene Feuchtegehalt gibt das Verhältnis der Masse des vorhandenen Wassers in der Probe zur Masse der trockenen Probe an. Das Prinzip zur Bestimmung des massebezogenen Feuchtegehaltes ist für alle porösen, wasserdurchlässigen Stoffe gleich. Nur die Anzahl der Probekörper kann verschieden sein und die Temperatur zur Trocknung der Baustoffe ist unterschiedlich. Laut ÖNORM EN ISO 12570 [39] werden folgende Trocknungstemperaturen verwendet:

- $105 \pm 2 \text{ °C}$ → Baustoffe, deren Struktur bei 105 °C unverändert bleibt, z.B. mineralische Baustoffe und Holz;
- $70 \pm 2 \text{ °C}$ → Baustoffe, bei denen sich die Struktur bei einem Temperaturbereich von 70 °C bis 105 °C verändern kann, z.B. Schaumkunststoffe;
- $40 \pm 2 \text{ °C}$ → Baustoffe, bei denen durch hohe Temperaturen Kristallwasser ausgetrieben werden kann oder die Zellgase beeinflusst werden können z.B. Gips.

Die Probe wird vor dem Trocknen gewogen und danach in einen belüfteten Wärmeschrank, auch Trocknungsschrank genannt, gegeben. Dort wird sie bis zum Erreichen der Massekonstanz getrocknet. Anschließend wird die Probe in einem Exsikkator abgekühlt, bevor sie dann neuerlich gewogen wird. Der massebezogene Feuchtegehalt lässt sich dann aus den ermittelten Werten berechnen. [39]

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \text{ [kg/kg]}$$

m = Masse des Probekörpers vor dem Trocknen [kg]

m_0 = Masse des trockenen Probekörpers [kg]

u = massebezogener Feuchtegehalt [kg/kg]

Volumenbezogener Feuchtegehalt

Der volumenbezogene Feuchtegehalt gibt das Volumen des vorhandenen Wassers in der Probe zum Volumen der trockenen Probe an. Zur Bestimmung des volumenbezogenen Feuchtegehaltes wird der massebezogene Feuchtegehalt, die Trockenrohddichte sowie die Dichte des Wassers ($\rho_w = 997,6 \text{ kg/m}^3$ bei 23 °C) benötigt. Die Trockenrohddichte und der volumenbezogene Feuchtegehalt lassen sich laut ÖNORM EN ISO 12570 [39] wie folgt berechnen:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\psi = u * \frac{\rho_0}{\rho_w} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}$$

ρ_0 = Trockenrohddichte des Baustoffes [kg/m³]

ρ_w = Dichte des Wassers [kg/m³]

ψ = volumenbezogener Feuchtegehalt [m³/m³]

m_0 = Masse des trockenen Probekörpers [kg]

u = massebezogener Feuchtegehalt [kg/kg]

V = Volumen des trockenen Probekörpers [m³]

Volumenbezogene Masse des Feuchtegehaltes

Die volumenbezogene Masse des Feuchtegehaltes ist das Produkt aus dem massebezogenen Feuchtegehalt und der Trockenrohddichte. Sie ist somit das Verhältnis der Masse des vorhandenen Wassers in der Probe zum Volumen der trockenen Probe. [39]

$$w = u * \rho_0 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

ρ_0 = Trockenrohddichte des Baustoffes [kg/m³]

u = massebezogener Feuchtegehalt [kg/kg]

w = volumenbezogene Masse des Feuchtegehaltes [kg/m³]

2.2.1.2 Wasseraufnahme

Wasseraufnahmekoeffizient - Kapillare Wasseraufnahme

Anhand vom Wasseraufnahmekoeffizienten (hier mit w abgekürzt) bezogen auf Kapillarwirkung lassen sich die Baustoffe laut [54] in vier Kategorien einteilen:

- **wasserdicht** → $w \leq 0,001$;
- **wasserabweisend** → $0,001 < w \leq 0,5$;
- **wasserhemmend** → $0,5 < w \leq 2,0$;
- **stark saugend** → $w > 2,0$.

Das Verfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten ist für Prüfkörper aus Naturstein, Mauerstein und Beton gleich. Die Probekörper (bei Betontragwerken mindestens drei und bei Naturstein und Mauerstein mindestens sechs) werden bis zur Massekonstanz getrocknet und danach gewogen. Anschließend wird die Probe in einen Behälter mit Wasser gegeben, wobei die Eintauchtiefe wenige Millimeter (Beton → 2 ± 1 mm, Mauerstein → 5 ± 1 mm und Naturstein → 3 ± 1 mm) beträgt. Um Luftbewegungen zu vermeiden, wird der Behälter noch mit einem Deckel verschlossen. In regelmäßigen Abständen wird dann die Probe aus dem Wasser genommen und gewogen, bis keine weitere Massezunahme mehr gemessen wird. [35] [37] [38]

In der ÖNORM EN 13057 [35], ÖNORM EN 1925 [37] und ÖNORM EN 772-11 [38] sind die Abkürzungen unterschiedlich, bedeuten aber dasselbe. Laut ÖNORM EN 772-11 [38] wird der Wasseraufnahmekoeffizient wie folgt berechnet:

$$c_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \cdot \sqrt{t_{so}}} * 10^6 \text{ [g/(m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})]$$

A_s = Gesamtfläche der in das Wasser getauchten Seite des Probekörpers [mm²]

$c_{w,s}$ = Wasseraufnahmekoeffizient [g/(m²*s^{0.5})]

$m_{dry,s}$ = Masse des getrockneten Probekörpers [g]

$m_{so,s}$ = Masse des Probekörpers nach dem Eintauchen über die Zeitspanne t [g]

t_{so} = Tauchzeit [s]

Maximale Wasseraufnahme

Zur Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme wird die Probe bis zu zwei Zentimeter mit Wasser überdeckt. Wie auch zuvor wird die Probe im getrockneten und im voll gesättigten Zustand gewogen. Mit den ermittelten Werten lässt sich dann die maximale Wasseraufnahme berechnen. [32]

$$W_{\max} = \frac{m_s - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \text{ [M\%]}$$

m_s = Masse der Probe nach Wasserlagerung [g]

m_{tr} = Masse der Probe nach der Trocknung [g]

W_{\max} = maximale Wasseraufnahme [M%]

2.2.2 Baustoffkennwerte von Beton

2.2.2.1 Mittlere Wassereindringtiefe

Die mittlere Wassereindringtiefe von Beton wird experimentell ermittelt. Dabei werden drei Probekörper verwendet, die während einer gewissen Zeit mit einem bestimmten Wasserdruck beansprucht werden. Bei Verwendung von Proben aus einem Bauwerk sollte der Wasserdruck die Richtung der Gebrauchsbeanspruchung haben. Nach Beendigung der Prüfung wird der Probekörper gespalten und die mittlere Wassereindringtiefe gemessen. Das Ergebnis ist dann der Mittelwert von den mittleren Wassereindringtiefen der drei verschiedenen Proben. [31]

2.2.2.2 Größte Wassereindringtiefe

Zur Bestimmung der größten Wassereindringtiefe wird ebenfalls auf einen Probekörper ein Wasserdruck angelegt. Die vom Wasser beanspruchte Fläche ist zuvor aufzurauen. Nach einer festgelegten Zeit wird der Probekörper vom Prüfgerät entfernt und gespalten. Dabei wird der Verlauf der Wassereindringung deutlich sichtbar und die größte Eindringtiefe lässt sich herausmessen. [34]

2.2.3 Baustoffkennwerte von Mauerwerk

2.2.3.1 Hygroskopische Ausgleichsfeuchte

Die hygroskopische Ausgleichsfeuchtigkeit ist jener Anteil der Gesamtfeuchtigkeit, der sich bei einer Wasseraufnahme unter einer relativen Luftfeuchtigkeit sowie einer Temperatur der

Umgebungsluft und einem Salzgehalt einstellt. Die Bestimmung erfolgt an einem ungetrockneten Probekörper in einem Klimaschrank oder Exsikkator. Die Proben werden dort bis zur Massekonstanz gelagert. Anschließend kann der Feuchtigkeitsgehalt bestimmt werden. [32]

$$A = \frac{m_k - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \text{ [M\%]}$$

A = hygroskopische Ausgleichsfeuchtigkeit [M%]

m_k = Masse der Probe nach Klimalagerung [g]

m_{tr} = Masse der Probe nach der Trocknung [g]

2.2.3.2 Durchfeuchtungsgrad

Der Durchfeuchtungsgrad gibt den zugänglichen Porenraum an, der mit Wasser gefüllt ist. Er wird aus dem Feuchtigkeitsgehalt (siehe Kapitel 2.2.1.1, Seite 32) und der maximalen Wasseraufnahme (siehe Kapitel 2.2.1.2, Seite 34) berechnet. [32]

$$D = \frac{F}{W_{max}} * 100 \text{ [\%]}$$

D = Durchfeuchtungsgrad [%]

F = Feuchtigkeitsgehalt [M%]

W_{max} = maximale Wasseraufnahme [M%]

2.2.3.3 Restsaugfähigkeit

Die Restsaugfähigkeit ist die Differenz zwischen der kapillaren Wasseraufnahme und dem Feuchtegehalt (siehe Kapitel 2.2.1.1, Seite 32). [32]

$$W_{kap} = \frac{m_{sk} - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \text{ [M\%]}$$

$$R = W_{kap} - F \text{ [M\%]}$$

F = Feuchtigkeitsgehalt [M%]

m_{sk} = Masse der Probe nach kapillarer Wasseraufnahme [g]

m_{tr} = Masse der Probe nach der Trocknung [g]

R = Restsaugfähigkeit [M%]

W_{kap} = Kapillare Wasseraufnahme [M%]

2.2.3.4 Hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad

Der hygroskopische Durchfeuchtungsgrad gibt den erreichbaren Minimalwert des Durchfeuchtungsgrades an. Er wird anhand der hygroskopischen Ausgleichsfeuchte (siehe Kapitel 2.2.3.1, Seite 34) und der maximalen Wasseraufnahme (siehe Kapitel 2.2.1.2, Seite 34) berechnet. [32]

$$D_h = \frac{A}{W_{max}} * 100 \text{ [\%]}$$

A = hygroskopische Ausgleichsfeuchte [M%]

D_h = hygroskopischer Durchfeuchtungsgrad [%]

W_{max} = maximale Wasseraufnahme [M%]

2.2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Übersicht über Normenbegriffe gegeben sowie eine Beschreibung der Feuchtigkeitsmessung gemacht. Es gibt noch einige andere Normen, die feuchtigkeitsbezogene Kenngrößen für spezielle Baustoffe (z.B.: Gasbeton) beschreiben. Für diese Arbeit wurden aber nur jene Normen ausgewählt, die Naturstein, Mauerwerk und Beton im Allgemeinen betreffen.

2.3 Messeffekte und -methoden zur Feuchtigkeitsbestimmung

Die Messverfahren unterscheiden sich in direkte und indirekte Methoden. Dabei geben die direkten Methoden die Baustofffeuchte quantitativ an [44]. Damit aber ein solches Ergebnis erreicht werden kann, muss dem zu untersuchenden Bauteil eine Probe entnommen werden, deshalb handelt es sich hierbei um zerstörende Verfahren. Die indirekten Methoden sind zerstörungsfrei bzw. zerstörungsarm, können aber auch keine quantitativen Ergebnisse liefern [52]. Die relevanten Messverfahren für mineralische Baustoffe werden auf den nachfolgenden Seiten näher beschrieben.

Im Anschluss daran werden die Verfahren anhand einer Tabelle in zwei Gruppen gegliedert. Einerseits gibt es Messverfahren, die zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes dienen und andererseits gibt es Verfahren, mit denen eine Feuchtigkeitsverteilung erstellt werden kann.

Die Abbildung 2.14, Seite 37 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Messverfahren.

2.3.1 Direkte Messmethoden

2.3.1.1 Thermogravimetrische Verfahren

Trockenschrankverfahren

Dieses Verfahren wird auch als das Darr-Wäge-Verfahren bezeichnet. In vielen Büchern ist es auch nur unter den Namen Darr-Methode oder Absolutverfahren zu finden.

Vorgangsweise:

Zuerst muss dem zu untersuchenden Baustoff eine Probe entnommen werden. Dies geschieht mittels Hammer und Meißel, Winkelschneider oder Bohrer. Bei der Verwendung eines Bohrers sollte möglichst kurz gebohrt werden, da sonst die entstehende Reibungswärme zu einem Wasserverlust im Baustoff führt und dadurch das Ergebnis verfälscht wird. Die **Wägung** kann vor Ort durchgeführt werden oder in einem Labor. Beim Transport ins Labor sollte sich der Wassergehalt der Probe nicht verändern, damit brauchbare Resultate erzielt werden können. Daher wird das zu untersuchende Stück wasserdampfdicht verpackt, sodass der Feuchteausaustausch mit der Umgebung vor der Wägung verhindert wird. [44]

Im Labor wird die feuchte Probe gewogen und danach in einen Trockenschrank gegeben, wo sie bei einer Temperatur von ungefähr 105 °C getrocknet wird. Bei calciumsulfathaltigen Baustoffen ist die Trocknungstemperatur geringer und beträgt nur noch 40 °C (siehe Kapitel 2.2.1.1, Seite 32). [44]

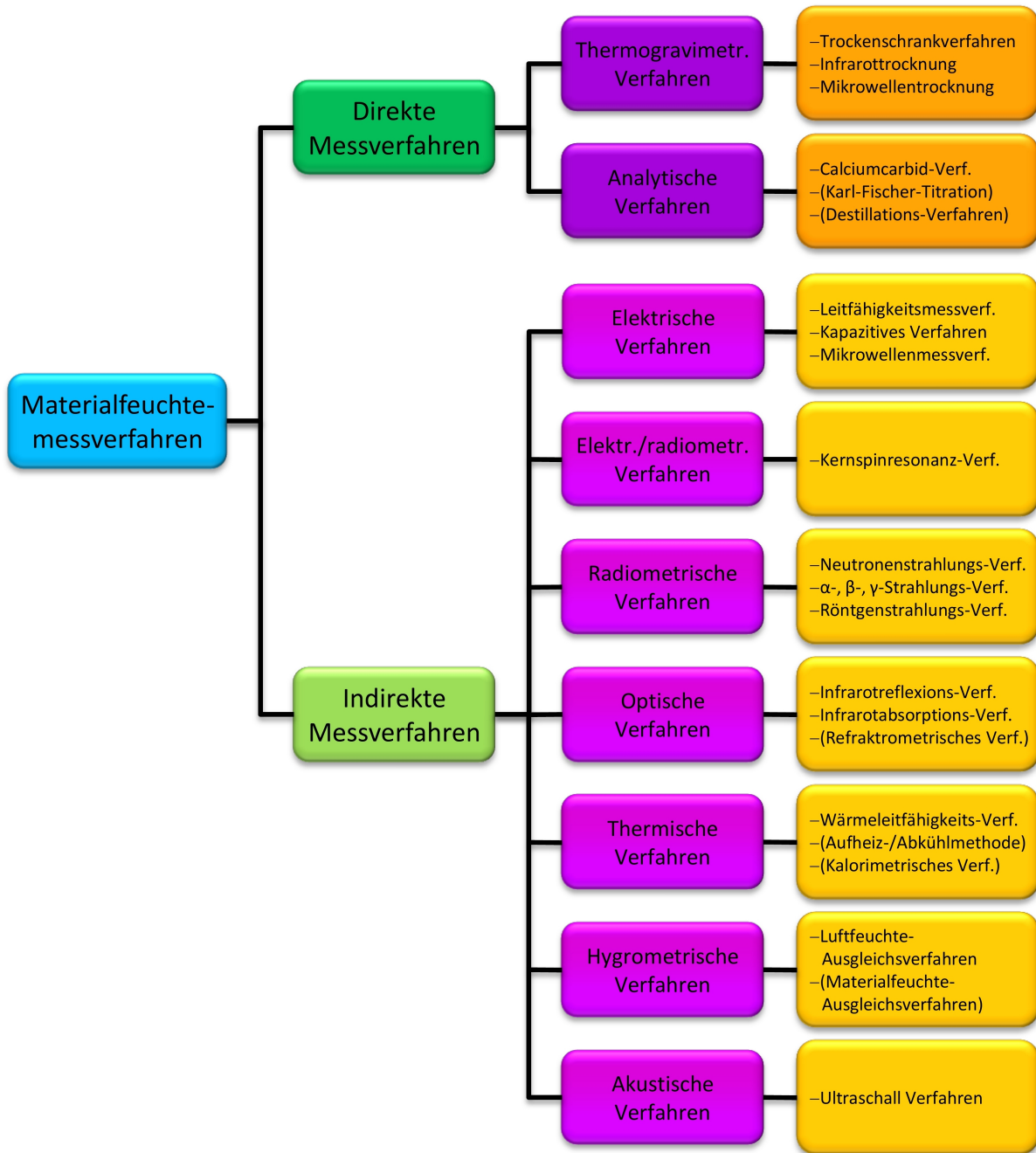


Abbildung 2.14: Klassifizierung der Materialfeuchtemessverfahren nach [23] verändert

Die erforderliche Wärmeenergie wird durch Konvektion an die Oberfläche der Probe gebracht und dann durch Wärmeleitung ins Innere weitergeführt [23]. Die Trocknung ist laut [44] beendet, wenn die Massendifferenz zwischen zwei Wägungen, die mindestens 24 Stunden auseinanderliegen, kleiner als 0,1 % der zuletzt festgestellten Masse ist. Dies ist der Fall, wenn zwischen dem Wasserdampfpartialdruck der Luft in der Probe und demjenigen im Trockenraum ein Gleichgewicht herrscht. [44]

Sobald die Probe in einem Exsikkator bei 0 % relativer Luftfeuchtigkeit abgekühlt ist, wird sie erneut gewogen. Die Mindestanzahl der Proben und die Mindestdauer der Trocknung sind in Normen festgelegt [44]. Mit den Messdaten kann dann laut [44] der Wassergehalt bestimmt werden:

$$u_m = \frac{m_f - m_t}{m_t} * 100 \text{ [%]}$$

m_f = Masse der entnommenen feuchten Baustoffprobe [kg]

m_t = Masse der Baustoffprobe nach dem Trocknen [kg]

u_m = Wassergehalt [%]

Vorteil:

Bei sorgfältigem Vorgang kann die Materialfeuchte mit einer großen Genauigkeit bestimmt werden. Das Verfahren ist international standardisiert. [52]

Nachteil:

Es handelt sich um ein zerstörendes Verfahren, deshalb können auch keine Messungen an der gleichen Stelle eines Bauteils wiederholt werden. Außerdem sind die Messergebnisse nicht sofort verfügbar und es kann zu Veränderungen des Wassergehaltes bei der Materialentnahme kommen, die dann zu Messfehlern führen. [52]

Infrarottrocknung und Mikrowellentrocknung

Diese Verfahren laufen gleich ab wie das Trockenschrankverfahren, nur dass bei diesen Verfahren die Trocknung mittels Infrarotstrahlung bzw. Mikrowellen erfolgt.

Vorgangsweise - Infrarottrocknung:

Die Infrarotstrahlung wird an der Oberfläche der Probe absorbiert und reflektiert [23]. Die Eindringtiefe hängt von der Wärmeleitung ab, dabei spielt die Farbe und die Struktur der Probe eine Rolle. Bei diesem Verfahren sollten kleine Probemengen mit möglichst homogenem Material verwendet werden. Andernfalls kann es zu einer ungleichmäßigen Aufheizung kommen. Dies würde dann zu einer unvollständigen Trocknung führen und Messfehler verursachen. [23]

Vorgangsweise - Mikrowellentrocknung:

Bei diesem Verfahren steigt die Temperatur im Inneren der Probe schneller an als an der Oberfläche. Dies bedeutet, dass sich ein Temperaturgefälle von innen nach außen einstellt. Dadurch wird die Trocknung begünstigt, denn das Wasser diffundiert aus der Probe, verdampft an der Oberfläche und kühlt diese gleichzeitig wieder ab. Durch das Abkühlen werden Verkrustungen an der Oberfläche verhindert und somit auch unvollständige Trocknungen. [23]

Vorteil:

Im Vergleich zur Trockenschrankmethode sind diese zwei Verfahren weniger zeitaufwendig.

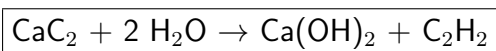
2.3.1.2 Analytische Verfahren

Calciumcarbid-Verfahren

Das Calciumcarbid-Verfahren wird auch oft als CM-Methode abgekürzt.

Vorgangsweise:

Diese Feuchtebestimmung beruht laut [44] auf der Reaktion von Calciumcarbid mit Wasser:



C_2H_2 = Acetylen

Ca(OH)_2 = Calciumhydroxid

CaC_2 = Calciumcarbid

H_2O = Wasser

Die entnommene Baustoffprobe wird zerkleinert und gewogen. Danach wird eine Druckflasche mit der Probe befüllt. Hinzu kommen noch eine festgelegte Anzahl an Stahlkugeln sowie eine Glasampulle, die eine bestimmte Menge an Calciumcarbid enthält. Die Druckflasche wird gut verschlossen und dann geschüttelt. Dabei zerstören die Kugeln die Glasampulle und das Calciumcarbid wird frei. [44]

Durch die zuvor beschriebene Reaktion entsteht nun das Acetylen. Dieses Gas erzeugt im Behälter einen **Überdruck**, der an einem Manometer auf der Druckflasche abgelesen werden kann. [44]

Es darf aber erst nach einer bestimmten Zeit abgelesen werden, da bei der chemischen Reaktion Wärme frei wird. Diese erhöht die Temperatur des Acetylen und somit auch dessen Druck. Aus den Werten der Probemasse und des Überdruckes lässt sich dann mit Hilfe von Umrechnungstabellen der Wassergehalt bestimmen. [44]

Vorteil:

Das Verfahren kann vor Ort ausgeführt werden und stellt bei der Durchführung nur einen geringen Aufwand dar. Des Weiteren liegen die Ergebnisse innerhalb kürzester Zeit vor. [44]

Nachteil:

Es können Fehler durch Wägefehler, eine zu kleinen Probe sowie durch eine unvollständige chemische Reaktion entstehen. Ebenso kann beim Zerkleinern Feuchte entweichen und somit das Ergebnis verändern [23]. Im Gegensatz zur Darr-Methode kann hier die Probe nicht in einzelne Baustoffe unterteilt werden. [20]

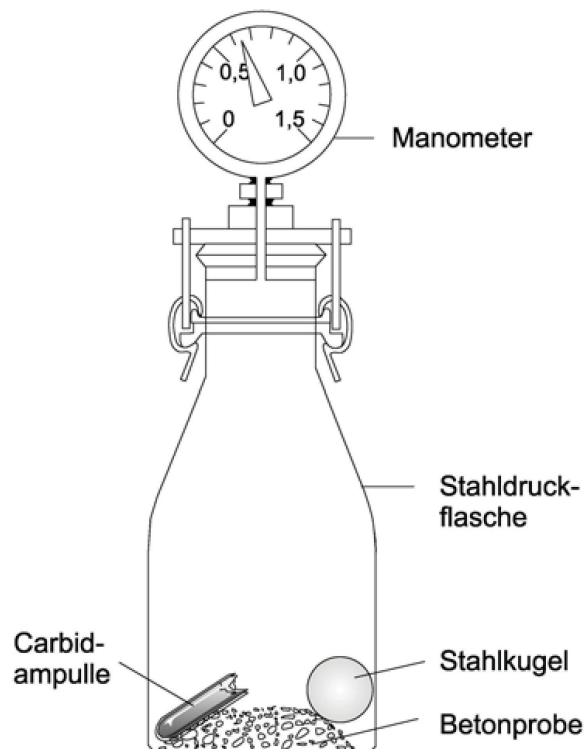


Abbildung 2.15: Materialien für das Calciumcarbid-Verfahren [29]

2.3.2 Indirekte Messmethoden

2.3.2.1 Elektrische Verfahren

Leitfähigkeitsmessverfahren

Das Leitfähigkeitsmessverfahren, auch Widerstandsmessung genannt, ist möglich, weil elektrische Eigenschaften von Baustoffen von der Feuchtigkeit abhängen. Viele Stoffe, welche eigentlich Nichtleiter sind, werden durch Befeuchtung leitfähig. [44]

Vorgangsweise:

Zur Messung werden Elektroden in den Baustoff eingeführt. Für eine zerstörungsfreie Untersuchung werden Oberflächenelektroden verwendet [44]. Das Messgerät erzeugt einen Strom, der durch die erste Elektrode in den Baustoff geleitet wird und über die zweite Elektrode wieder zurück zum Messgerät gelangt (siehe Abbildung 2.16, Seite 40). Da die Spannung und die Stromstärke bekannt sind, kann sich das Gerät über das Ohm'sche Gesetz den **Widerstand** im Baustoff berechnen. Dieser gibt schlussendlich Auskunft über die Feuchtigkeit, denn der Baustoff ist nur leitfähig, wenn sich Wasser darin befindet. Das heißt, je besser die Leitfähigkeit ist, desto geringer ist der Widerstand und desto mehr Feuchtigkeit befindet sich im Bauteil. [12]

Sowohl die Temperatur als auch gelöste Salze im Baustoff beeinflussen die Leitfähigkeit und können das Messergebnis verfälschen. Daher wird der Einfluss verschiedener Ionenkonzentrationen mittels Kalibrierkurven berücksichtigt. Der Einfluss der Temperatur lässt sich auf zwei Arten einkalkulieren: einerseits durch einen temperaturabhängigen Kompensationswiderstand und andererseits durch eine interne Temperaturumrechnung im Messgerät. [44]

Vorteil:

Die Messung erfolgt mit einem geringen Aufwand. Bei der zerstörungsfreien Methode können daher eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt werden, so dass eine gute Aussage über die Feuchteverteilung in der Baukonstruktion möglich ist. [30]

Nachteil:

Bei Bauteilen mit gelösten Salzen ist das Ergebnis kritisch zu hinterfragen. [30]

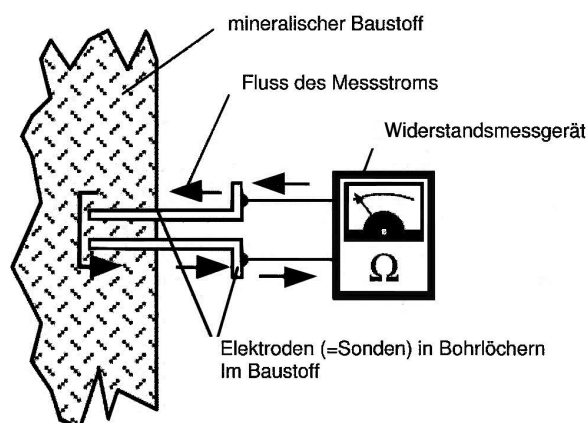


Abbildung 2.16: Prinzip der Widerstandsmessung [12]

Dielektrische Verfahren

Hierbei gibt es eine Unterteilung in das kapazitive Verfahren und in das Mikrowellenmessverfahren. Bei beiden Methoden spielt die **Dielektrizitätskonstante** von Baustoff und Wasser eine Rolle.

Wasser ist aufgrund der Bildung von Dipolen polarisierbar (siehe Kapitel 2.1.3.1, Seite 29). Das heißt, das Wassermolekül richtet sich in einem von außen angelegten elektrischen Feld aus. Die Frequenz beeinflusst die Bewegung der Teilchen. Bei hohen Frequenzen folgen nur noch die Wassermoleküle dem angeregten Feld. [68]

a) Kapazitives Verfahren

Es wird hier zusätzlich noch in ein niederfrequentes und in ein hochfrequentes Verfahren unterschieden [52]. Der Unterschied liegt im Frequenzbereich des Messgerätes. Bei den niederfrequenten Verfahren liegt dieser bei unter 100 MHz und bei den hochfrequenten Verfahren wird ein Frequenzbereich von über 100 MHz angewendet. In der Praxis basieren die Messgeräte hauptsächlich auf dem hochfrequenten Verfahren. Der Grund dafür ist, dass bei einer höheren Frequenz der Einfluss der Salze eliminiert werden kann. [44]

Vorgangsweise:

Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ist erheblich größer als von mineralischen Baustoffen. Durch die Kenntnis dieser Zahl kann daher eine Aussage über die Feuchtigkeit im Material gemacht werden. Die Dielektrizitätskonstante lässt sich aber nicht direkt ermitteln. Deshalb wird beim kapazitiven Verfahren durch die **Kapazität** eines Kondensators auf die Konstante rückgeschlossen. [11]

Am Baustoff werden zwei Kondensatorplatten befestigt. Strom wird angelegt und die Kondensatorplatten laden sich auf. Eine Platte ist positiv geladen und die andere negativ, dadurch entsteht ein elektromagnetisches Feld (siehe Abbildung 2.17, Seite 42). Im Inneren des Baustoffes werden durch dieses Feld Dipole gebildet, die sich zwischen den Kondensatorplatten kompensieren und an den Platten jeweils eine entgegengesetzte Ladung erzeugen. Dies verursacht ein inneres Feld, welches dem äußeren entgegenwirkt (siehe Abbildung 2.18, Seite 42). Dadurch sinkt die Feldstärke und Spannung am Kondensator und die Kapazität steigt. [11]

Je besser die Dipolbindung im Material ist, was bei einer hohen Dielektrizitätskonstante, welche das Wasser besitzt, der Fall ist, desto größer wird die Kapazität. Die Änderung der Kapazität ist schließlich das Maß für die Dielektrizitätskonstante und somit auch für die Feuchtigkeit. [11]

Vorteil:

Das Verfahren ist absolut zerstörungsfrei. Bei den hochfrequenten Messgeräten hat der Salzgehalt keinen Einfluss auf das Ergebnis. [44]

Nachteil:

Bei den niederfrequenten Messgeräten beeinflusst der Salzgehalt das Resultat. Es können auch Messfehler auftreten, wenn der Kontakt von den Kondensatorplatten zum Material nicht kontinuierlich ist. [44]

b) Mikrowellenmessverfahren

Es wird so wie zuvor der Unterschied der hohen relativen Dielektrizitätskonstanten von Wasser zu anderen Materialien ausgenutzt. Die Messfrequenz liegt zwischen 0,3 und 20 GHz. [61]

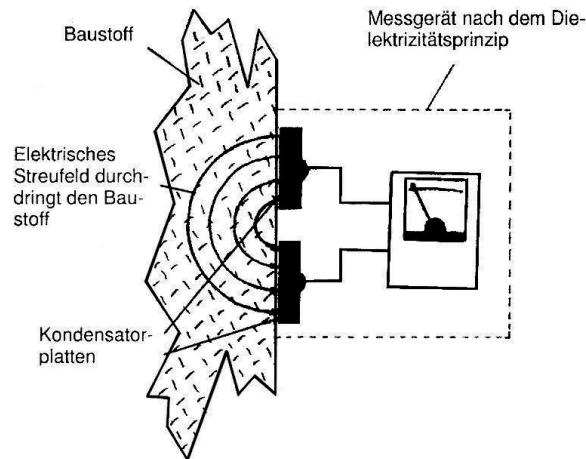


Abbildung 2.17: Prinzip der kapazitiven Messung [12]

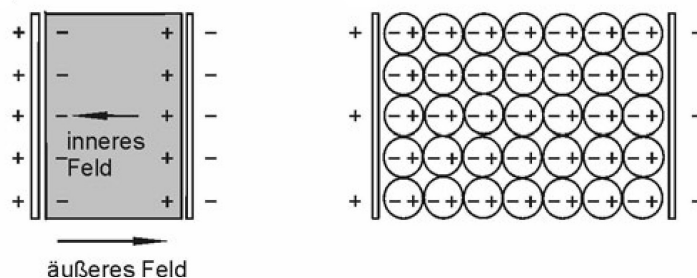


Abbildung 2.18: Kondensator mit Dielektrikum [11]

Vorgangsweise:

Beim Mikrowellenmessverfahren werden die **ausgesandten und empfangenen Wellen** gemessen und deren Unterschiede berechnet, die durch Dämpfung der Amplitude und Phasenverschiebung verursacht wurden. [61]

Grund dafür ist die Absorption der hochfrequenten Wellen im Inneren des Baustoffes sowie die Reflexion, Brechung und Streuung der Wellen an den Grenzschichten des Dielektrikums [61]. Es gibt laut [61] zwei Verfahren, auf denen diese Messung basiert:

- **Transmissionsverfahren:** Bei der Transmission werden auf einer Seite Wellen ausgesandt, welche entweder an der Grenzfläche des Materials reflektiert oder im Inneren teilweise bis vollständig absorbiert werden. Die veränderten Wellen werden dann auf der anderen Seite wieder empfangen und es kann die Änderung der Amplitude und Phase berechnet werden. Mit zunehmendem Wassergehalt wird die Absorption größer und es wird weniger Energie empfangen.
- **Reflexionsverfahren:** Hier erfolgt die Messung nur auf einer Seite. Dabei werden die Wellen, welche den Stoff durchqueren, reflektiert und mit einem Messgerät aufgenommen. Das Messergebnis hängt von der Dielektrizitätskonstanten ab. Denn je mehr Wasser sich im Baustoff befindet, desto mehr Energie wird zum Messgerät reflektiert.

Vorteil:

Aufgrund der hohen Messfrequenz beeinflusst die Ionenleitfähigkeit von Salz das Messergebnis nicht. Ebenso hat die Oberfläche des Materials keinen Einfluss auf die Messung, da das Verfahren ohne Materialkontakt vor sich geht. [61]

Nachteil:

Das Ergebnis ist nur ein gemittelter Feuchtegehalt, der keinen Aufschluss über die Feuchteverteilung im Material gibt. Verschiedene Größen wie Dicke, Dichte und Körnung des Baustoffes können die Messgenauigkeit negativ beeinflussen. [61]

2.3.2.2 Elektrisch/Radiometrische Verfahren

Kernspinresonanz Verfahren

Dieses Verfahren ist eine Mischung aus dem elektrischen und radiometrischen Verfahren. Die Nukleare-Magnetische-Resonanz-Methode, kurz NMR-Methode, nutzt die Eigenrotation der positiven geladenen Wasserstoffkerne aus. Durch diese Fähigkeit können die Wasserstoffatome ein magnetisches Feld bilden, das für dieses Verfahren gebraucht wird. [19]

Vorgangsweise:

An das Untersuchungsobjekt wird ein Magnetfeld angelegt, an dem sich die Wasserstoffkerne ausrichten. Danach wird ein elektromagnetischer Impuls mit einer bestimmten Frequenz, der Resonanzfrequenz, eingestrahlt. Dabei nehmen die Kerne diese Energie auf und ändern dadurch ihr Energieniveau. Bei Beendigung des Impulses geben sie die Energie wieder ab und kehren in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Durch die abgegebene Energie und die dafür benötigte Zeit kann die Anzahl der Wasserstoffkerne bestimmt werden. Somit ist dann ein Maß für den Wassergehalt vorhanden. [19]

Vorteil:

Die Methode arbeitet wasserbezogen und sehr genau. Im Gegensatz zu den kernphysikalischen Verfahren entsteht hier keine schädliche Strahlung. [44]

Nachteil:

Es wird das gesamte Wasser gemessen, auch das chemisch gebundene. [44]

2.3.2.3 Radiometrische Verfahren

Neutronenstrahlungs-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die Wechselwirkung zwischen feuchtem Material und Kernstrahlung ausgenutzt.

Vorgangsweise:

Durch α -Strahler oder β -Strahler und Beryllium werden Neutronen mit hoher kinetischer Energie erzeugt. Die schnellen Neutronen werden in den Baustoff eingestrahlt und treffen dort auf die Wasserstoffatome. Bei dem Zusammenstoß geben die Neutronen den fast ruhenden Atomkernen der Wasserstoffatome Energie ab. Durch diesen Vorgang werden die Neutronen langsamer. [44]

Die nun sogenannten thermischen Neutronen werden mit einem Detektor gemessen, wobei die ermittelte **Intensität der Neutronen** Auskunft über die vorhandenen Wasserstoffatome gibt und somit auch über die Feuchte im Baustoff. Da bei diesem Verfahren aber auch das chemisch gebundene Wasser erfasst wird, müssen die Messgeräte bei der Kalibrierung den Wasserstoffanteil des trockenen Baustoffes berücksichtigen. [44]

Das Ergebnis ist die Volumenfeuchte, damit ist der Wasseranteil je Volumeneinheit gemeint. Um den Wassergehalt in Gewichtsprozent zu erhalten, muss die Volumenfeuchte durch die

Dichte dividiert werden [30]. Daraus zeigt sich, dass die Messung von der Dichte abhängt, daher wird diese in manchen Fällen noch zusätzlich gemessen und in die Berechnung mit einkalkuliert. [23]

Vorteil:

Weder der Einfluss der Temperatur noch die Ionenkonzentration beeinflussen den Messvorgang. Außerdem spricht für dieses Verfahren die große Eindringtiefe bzw. das große Messvolumen. [44]

Nachteil:

Die Messung ist mit einem großen Aufwand verbunden, da wegen der Radioaktivität ein Strahlenschutz benötigt wird [22]. Weiters wird für die Anwendung und den Transport eine behördliche Genehmigung benötigt und die Untersuchung selbst darf nur von speziell geschultem Personal durchgeführt werden. [44]

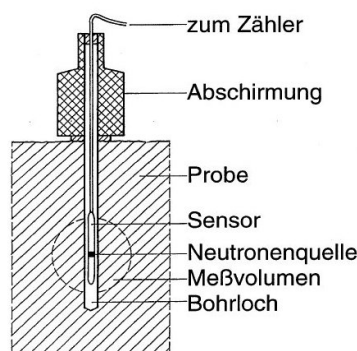


Abbildung 2.19: Prinzip des Neutronenstrahlungs-Verfahrens [25]

Gamma-Strahlungs- und Röntgenstrahlungs-Verfahren

Bei den Kernstrahlungsverfahren gibt es noch die α -Strahlung, β -Strahlung, γ -Strahlung und Röntgenstrahlung. Die γ -Strahlung hat im Gegensatz zu der α - und β -Strahlung eine hohe Reichweite und Eindringtiefe. [23]

Röntgen- und γ -Strahlen haben die gleiche Energie, Wellenlänge und Eindringtiefe. Daher erfolgt die Messung dieser beiden Methoden nach dem gleichen Prinzip. Die Vor- und Nachteile sind ebenfalls dieselben. Der einzige Unterschied liegt in der Erzeugung der Strahlung. Die Röntgen-Strahlung wird mit Röntgenröhren und der Verwendung von Hochspannung erzeugt. [44]

Vorgangsweise:

Als Strahlungsquellen werden bei diesem Verfahren die Elemente Americium, Kobalt und Cäsium verwendet [44]. Wenn die Strahlung durch den Baustoff geschickt wird, nimmt sie aufgrund der Schichtdicke, der Dichte des Materials sowie des Absorptionskoeffizienten ab [23]. Daher wird die **Intensität der γ -Strahlung** vor und nach der Transmission gemessen. Aus den ermittelten Daten lässt sich dann die Gesamtdichte bestimmen. Durch Abziehen der Dichte des Baustoffes im trockenen Zustand kann die Feuchte berechnet werden. Dies setzt jedoch die Kenntnis über die Trockenrohddichte voraus. [44]

Vorteil:

Wie beim Neutronenstrahlungs-Verfahren hat die Temperatur oder Ionenkonzentration keinen Einfluss auf die Messung.

Nachteil:

Bei Materialien mit großen Dichteunterschieden ist die Bestimmung des Wassergehaltes mit diesem Verfahren kaum möglich. Hinzu kommt, dass auch für dieses Verfahren eine Genehmigung benötigt wird und auch der Aufwand für den Strahlenschutz sehr groß ist. [44]

2.3.2.4 Optische Verfahren

Infrarot-Messverfahren

Beim Infrarot-Messverfahren gibt es zwei Varianten, das Infrarotemissions- und das Infrarotreflexions-Verfahren. Vom Ablauf her sind sich die beiden sehr ähnlich.

Vorgangsweise - Infrarotemissions-Verfahren:

Ein Bauteil sendet elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich aus. Diese langwelligen Wärmestrahlungen können mittels einer Infrarotkamera aufgenommen werden. Auf dem Wärmebild (siehe Abbildung 2.20, Seite 46), auch Thermogramm genannt, sind dann die verschiedenen **Oberflächentemperaturen** des Bauteils anhand unterschiedlicher farblicher Flächen zu erkennen. Diese können auch ein Indiz für Baustofffeuchte sein. Vorhandenes Wasser entzieht durch Verdunstung dem Baustoff Energie. Dies führt zu einer Absenkung der Oberflächentemperatur. [44]

Zudem ist die Wärmeleitfähigkeit bei feuchten Materialien größer, was einen schnelleren Energieabfluss zur Folge hat. Die Oberflächentemperatur wird aber noch von anderen Faktoren, z.B. konstruktive Wärmebrücken, Inhomogenität des Baustoffs oder Verschattungen beeinflusst. Daher kann mit dem Verfahren nur eine grobe, qualitative Aussage über den Feuchtegehalt des Bauteils gemacht werden. [44]

Vorgangsweise - Infrarotreflexions-Verfahren:

In diesem Fall wird die zu untersuchende Fläche zusätzlich mit Infrarotlicht bestrahlt. Die Kamera nimmt daher nicht mehr nur die Wärmestrahlung des Objektes auf, sondern auch die reflektierende Infrarotstrahlung. Die Wellenlänge der Strahlung ist extra so gewählt, dass das Licht vom Wasser besonders stark absorbiert wird. Dadurch werden die feuchten Stellen am Infrarotbild deutlich erkennbar. [44]

Vorteil:

Für die Untersuchung wird kein Kontakt zum Baustoff benötigt, sodass die Aufnahme auch aus weiter Ferne erfolgen kann. Das Verfahren gibt einen schnellen, qualitativen Überblick über große Flächen. [44]

Nachteil:

Vor allem die erste Methode ist sehr anfällig gegenüber Umgebungseinflüssen, wie zum Beispiel Staub und gibt dann keinen eindeutigen Aufschluss mehr über den Feuchtegehalt. [44]

2.3.2.5 Thermische Verfahren

Wärmeleitfähigkeits-Verfahren

Der Feuchtegehalt beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit, deshalb kann bei Stoffen mit bekannter Wärmeleitfähigkeit ein Rückschluss auf die Feuchtigkeit gemacht werden. Bei unbekannter Wärmeleitfähigkeit lässt sich zumindest eine Feuchteänderung bestimmen. [23]



Abbildung 2.20: Thermogramm eines Gebäudes [63]

Vorgangsweise:

Bei der sogenannten Sondenmethode wird ein elektrischer **Widerstandsdraht** mit Temperaturfühlern ausgestattet. Dieser wird in das Material eingestochen oder in ein kleines Bohrloch eingebracht. Zuerst wird der Draht elektrisch erhitzt und gibt diese Energie an den Baustoff ab. Anschließend kühlt er wieder ab. Aus dem zeitlichen Ablauf der Erhitzung und der Abkühlung kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet und eine Aussage über den Feuchtegehalt gemacht werden. [44]

Vorteil:

Der Heizdraht kann mit mehreren Temperaturfühlern ausgestattet werden und bietet so die Möglichkeit, in unterschiedlichen Tiefen Messungen durchzuführen. Der Einfluss von Salzen ist minimal, sodass er vernachlässigt werden kann. Die Sondenmethode eignet sich auch für längere Einsätze. [44]

Nachteil:

Bei härteren Baustoffen können die Bohrungen zu einem falschen Ergebnis führen [44]. Außerdem ist durch das Aufheizen des Drahtes eine Beeinflussung des Feuchteprofils möglich. [22]

2.3.2.6 Hygrometrische Verfahren

Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren

Mit diesem Verfahren wird die relative Luftfeuchte bestimmt, die sich in einem geschlossenen Hohlraum einstellt. [44]

Vorgangsweise:

In einem nach außen hin abgedichteten Bohrloch findet zwischen der Materialoberfläche und der umgebenden Luft ein Feuchteaustausch statt. Der Austausch endet, sobald sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Baustoff und der Luft ergibt. Ein in das Bohrloch eingebrachter **Feuchtesensor** misst dann die vorhandene Luftfeuchte. Anschließend kann anhand der bekannten Sorptionsisotherme mit der zuvor ermittelten Luftfeuchte eine Schlussfolgerung auf die Feuchte des Baustoffes gezogen werden. [52]

Vorteil:

Das Verfahren kann auch für Messungen, die über einen längeren Zeitraum gehen, genutzt werden. [44]

Nachteil:

Bei einer zu großen Temperaturdifferenz zwischen Baustoff und umgebender Luft können Fehler bei der Messung auftreten. [44]

2.3.2.7 Akustische Verfahren**Ultraschall Verfahren**

Die Feuchtigkeit wirkt der Ausbreitung von Schwingungen entgegen und verändert auch die Schallgeschwindigkeit. Als charakteristische Materialkenngröße vergrößert sich die Ultraschallgeschwindigkeit mit der Feuchtebelastung eines Baustoffes. [52]

Vorgangsweise:

Bei der Messung wird mit einem Impulsmesser das Ultraschallsignal erzeugt und durch den Baustoff geschickt. Am anderen Ende wird das Signal aufgenommen und elektronisch weiterverarbeitet. [52]

Nachteil:

Das Ultraschallsignal wird noch von anderen Parametern wie der Baustoffart, dem Gefüge oder dem Vorkommen von Salzen beeinflusst. Da auch keine Trennung der unterschiedlichen Einflüsse möglich ist, kann dieses Verfahren maximal für eine Messung zur groben Orientierung verwendet werden. [52]

2.3.3 Feuchtigkeitsgehalt und Feuchtigkeitsverteilung

In der nachstehenden Tabelle ist ersichtlich, ob das jeweilige Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, der Feuchtigkeitsverteilung oder für beide dieser Bestimmungen dient. Somit kann mit den Verfahren die Feuchtigkeit nur an einem Punkt gemessen oder über eine größere Fläche ermittelt werden.

Tabelle 2.2: Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes und der Feuchtigkeitsverteilung

Messverfahren	Feuchtigkeitsgehalt	Feuchtigkeitsverteilung
Trockenschrankverfahren	x	
Calciumcarbid-Verfahren	x	
Leitfähigkeitsmessverfahren	x	x
Kapazitives Verfahren	x	
Mikrowellenmessverfahren	x	x
Neutronenstrahlungs-Verfahren	x	x
Gammastrahlungs-Verfahren	x	x
Kernspinresonanz Verfahren	x	
Infrarot-Messverfahren		x
Wärmeleitfähigkeits-Verfahren	x	
Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren	x	
Ultraschall Verfahren	x	

2.3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die unterschiedlichen Messverfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in einem Baustoff erläutert. Dabei wurde auch eine Tabelle erstellt, in der ersichtlich ist, ob sich das jeweilige Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, der Feuchtigkeitsverteilung oder für beide dieser Bestimmungen eignet. Die Informationen dieses Kapitels werden für die nachfolgend beschriebenen Messgeräte benötigt.

Kapitel 3

Geräte und Verfahren für Feuchtemessungen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik von Systemen für Feuchtemessungen an Betonbauteilen gegeben. Danach folgt ein Vergleich der möglichen Systeme, die für eine Überwachung des Feuchtigkeitsgehaltes geeignet wären. Anschließend wird eine Checkliste erstellt, anhand der ein geeignetes Messgerät für die jeweilige Feuchtigkeitsuntersuchung ausgewählt werden kann.

Zur standardisierten Beschreibung der am Markt erhältlichen Geräte wird eine Tabelle erstellt, die folgende Kriterien beinhaltet:

- Messverfahren
- Verfahrensbeschreibung
- Voraussetzungen für die Messdurchführung
- Einflussgrößen
- Aufwand und Kosten
- Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe
- Regelwerke
- Hersteller und Geräte

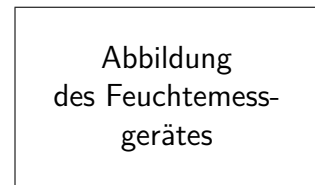
Zum besseren Überblick werden am Anfang des Kapitels die nachfolgend beschriebenen Messverfahren in einer Tabelle (siehe Tabelle 3.1, Seite 51) zusammengefasst. Es erfolgt eine Unterteilung nach zerstörenden und zerstörungsarmen bzw. zerstörungsfreien Verfahren und eine alphabetische Auflistung der Messverfahren mit dem jeweiligen Seitenverweis (siehe Tabelle 3.1, Seite 51).

Erläuterung der Tabelle

Die jeweiligen Geräte sind zur besseren Vergleichbarkeit in tabellarischer und stets gleicher Gliederung beschrieben. Die Überschrift ist immer die Bezeichnung des Feuchtemessverfahrens, nach welchem das jeweilige Gerät funktioniert. Darunter befinden sich in Klammer die dazugehörigen Quellenangaben und rechts davon ist das Feuchtemessgerät abgebildet. Die erste Spalte beinhaltet die Kriterien und die zweite die gerätespezifischen Daten.

Bezeichnung des Feuchtemessverfahrens

(Quellenangaben)



Messverfahren	Hier erfolgt die Untergliederung nach der Einteilung aus dem Kapitel 2.3.
Verfahrensbeschreibung	Die Geräte arbeiten nach verschiedenen Methoden. In diesem Bereich wird ihre Anwendung und der Messvorgang näher beschrieben. Für detaillierte Erläuterungen wird hier zum Kapitel 2.3 verwiesen.
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Hier werden die zusätzlich erforderlichen Apparaturen für die Messung sowie die benötigten Vorkehrungen aufgelistet, um die Messung durchführen zu können. Ebenso gehört zu diesem Punkt, ob ein geschultes Personal benötigt wird.
Einflussgrößen	Die Messungen werden durch äußere Einwirkungen beeinflusst. Deshalb erfolgt hier eine Beschreibung der Faktoren und deren Einfluss auf die Messung.
Aufwand und Kosten	Dieser Teil gibt Auskunft, wie aufwendig das Verfahren und auch wie hoch der finanzielle Aufwand ist.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	Die Eindringtiefen in das Material hängt vom jeweiligen Gerät ab. Der Messbereich und die Genauigkeit sind daher ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Messinstrumentes.
Regelwerke	Falls das Verfahren standardisiert ist, wird hier das dazugehörige Regelwerk angegeben.
Hersteller und Geräte	In dieser Spalte werden die Produktbezeichnungen der Hersteller und auch die jeweiligen Hersteller angeführt.

Tabelle 3.1: Überblick über Messverfahren

Methode	Messverfahren	Seite
Zerstörende Messverfahren	- Calciumcarbid-Verfahren	53
	- Trockenschrankverfahren	52
Zerstörungsarme und zerstörungsfreie Messverfahren	- Faseroptischer Feuchtesensor	66
	- Gamma-Strahlungs-Verfahren	63
	- Impuls-Radar-Verfahren	60
	- Infrarotemissions-Verfahren	64
	- Infrarotreflexions-Verfahren	65
	- Kapazitives Verfahren	56
	- Kapazitives Verfahren (Mikro-Elektro-Mechanische System = MEMS)	57
	- Kernspinresonanz-Verfahren	61
	- Leitfähigkeitsmessverfahren	54
	- Leitfähigkeitsmessverfahren (Multiring-Elektrode)	55
	- Mikrowellenmessverfahren	58
	- Neutronenstrahlungs-Verfahren	62
	- Time-Domain Reflektometrie	59
- Wärmeleitfähigkeits-Verfahren (Lambda-Sonde)	67	

3.1 Zerstörende Feuchtemessverfahren

3.1.1 Trockenschrankverfahren

([23] [33] [44] [64] [67] [68] [69])



Messverfahren	thermogravimetrisch - Trockenschrankverfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Die Messung erfolgt in einem Labor. Die feuchte Probe wird gewogen und in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von ungefähr 105 °C getrocknet. Die erforderliche Wärmeenergie zur Trocknung gelangt durch Konvektion an die Oberfläche der Probe. Die Wärme wird dann durch Wärmeleitung ins Innere weitergeführt.</p> <p>Die Trocknung ist beendet, wenn zwischen dem Wasserdampfpartialdruck der Luft in der Probe und demjenigen im Trockenraum ein Gleichgewicht herrscht. Die abgekühlte Probe wird in einem Exsikkator bei 0% relativer Luftfeuchtigkeit erneut gewogen. Mit den Messdaten, die vor und nach der Trocknung ermittelt wurden, kann dann der Wassergehalt bestimmt werden (siehe Kapitel 2.3.1.1, Seite 36).</p> <p>Das Verfahren kann auch mittels Infrarotstrahlung, Halogenstrahlung und Mikrowellen erfolgen. Der Vorteil dabei ist, dass diese Methoden weniger Zeit beanspruchen und die Wärmeeinstrahlung gleichmäßiger vor sich geht.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Um die Materialfeuchte mit einer großen Genauigkeit zu bestimmen, sollte die Messung von einem erfahrenen Techniker durchgeführt werden. Die Probeentnahme erfolgt mittels Hammer und Meißel, Winkelschneider oder Bohrer.
Einflussgrößen	Bei der Probeentnahme könnte Reibungswärme entstehen, die zu einem Wasserverlust im Baustoff führt. Deshalb sollte bei der Verwendung eines Bohrers möglichst kurz gebohrt werden. Ebenso muss ein Feuchteaustausch mit der Umgebung vor der Wägung verhindert werden, da sich sonst der Wassergehalt der Probe ändert.
Aufwand und Kosten	sehr aufwendig; 430 € bis 670 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; ± 0,1 % bis ± 1 %; k.A.
Regelwerke	ÖNORM B 3355-1
Hersteller und Geräte	ATP: Halogen-Feuchtebestimmer; hf sensor: Moist xLAB 100; Mettler Toledo: Halogen Moisture Analyzer; PCE: MB-Serie.

3.1.2 Calciumcarbid-Verfahren

([23] [44] [66] [70])



Messverfahren	analytisch - Calciumcarbid-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Diese Feuchtebestimmung beruht auf der Reaktion von Calciumcarbid mit Wasser. Die Menge des Probematerials ist von der Korngröße abhängig und beträgt 20 bis 50 g. Die entnommene Baustoffprobe wird zerkleinert, um möglichst viele Kapillarporen offenzulegen und anschließend gewogen. Danach wird die Probe in eine Druckflasche gegeben. Hinzu kommen noch eine festgelegte Anzahl an Stahlkugeln (meistens 4) sowie eine Glasampulle, die eine bestimmte Menge an Calciumcarbid enthält. Nachdem die Druckflasche gut verschlossen ist, wird sie geschüttelt. Bei diesem Vorgang zerstören die Kugeln die Glasampulle, wodurch das Calciumcarbid frei wird.</p> <p>Durch die Reaktion von Wasser mit dem Calciumcarbid entsteht das Acetylen (siehe Kapitel 2.3.1.2, Seite 38). Dieses Gas erzeugt im Behälter einen Überdruck, der an einem Manometer auf der Druckflasche angezeigt wird.</p> <p>Der Wert kann abgelesen werden, sobald sich bei weiterem Schütteln der Druck nicht mehr ändert. Anhand der Werte der Probemasse, des Überdruckes und einer Umrechnungstabelle lässt sich der Wassergehalt bestimmen.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Das Verfahren kann vor Ort ausgeführt werden, sollte aber von einem erfahrenen Techniker erfolgen. Um an das Probematerial zu gelangen, muss zuvor dem zu untersuchenden Objekt das Material entnommen werden. Dies geschieht mittels Hammer und Meißel, Winkelschneider oder Bohrer.
Einflussgrößen	Durch Wägefehler, einer zu kleinen Probe sowie durch eine unvollständige chemische Reaktion kann das Ergebnis verfälscht werden. Ebenso kann beim Zerkleinern eventuell Feuchte entweichen und das Ergebnis somit verändern. Die Probe kann nicht in einzelne Baustoffe unterteilt werden.
Aufwand und Kosten	sehr aufwendig; 430 € bis 670 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A.; ± 1 % bis ± 3 %; k.A.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Gann: CM-B, CM-P; Trotec: CM-Messgerät.

3.2 Zerstörungsarme und zerstörungsfreie Feuchtemessverfahren

3.2.1 Leitfähigkeitsmessverfahren

([12] [30] [44] [64] [67] [70])



Messverfahren	elektrisch - Leitfähigkeitsmessverfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Das Messgerät besitzt entweder eine Messkugel, die für die Messung mit dem Baustoff in Kontakt sein muss, oder zwei Elektroden, die in den Baustoff eingeführt werden. Vom Messgerät wird Strom durch die erste Elektrode in den Baustoff geleitet. Über die zweite Elektrode gelangt der Strom wieder zurück zum Messgerät (siehe Kapitel 2.3.2.1, Seite 40).</p> <p>Die Spannung und die Stromstärke sind bekannt, dadurch kann das Gerät anhand des Ohm'schen Gesetzes den Widerstand im Baustoff berechnen. Der Baustoff ist nur leitfähig, wenn sich Wasser darin befindet. Je geringer der gemessene Widerstand ist (d.h. je besser die Leitfähigkeit ist), desto mehr Feuchtigkeit befindet sich im Bauteil.</p> <p>Bei dieser Methode können eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt werden, so dass eine gute Aussage über die Feuchteverteilung in der Baukonstruktion möglich ist.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für das Ergebnis sind Kalibrierkurven, die Ionenkonzentrationen berücksichtigen, notwendig, weil auch Salze die Leitfähigkeit beeinflussen. Weiters muss der Einfluss der Temperatur einkalkuliert werden. Dies geschieht mit einem temperaturabhängigen Kompensationswiderstand oder mit einer internen Temperaturumrechnung im Messgerät.
Einflussgrößen	Salzgehalt, Temperatur, Porengrößenverteilung, Kontakt der Elektroden zum Baustoff
Aufwand und Kosten	geringer Aufwand; 20 € - 600 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; ± 0,05 % bis ± 3 %; bis zu 40 mm bzw. fühlernabhängig.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	ATP: HumidCheck Non-Contact, HumidCheck Mini, HM-340; PCE: PCE-HGP, FMW, FMC, FME, FMD; Trotec: BM15, BM20, T500.

3.2.2 Multiring-Elektrode

([8] [41] [42] [43])



Messverfahren	elektrisch - Leitfähigkeitsmessverfahren - Multiring-Elektrode
Verfahrensbeschreibung	<p>Das Verfahren basiert auf dem Leitfähigkeitsmessverfahren (siehe Kapitel 3.2.1, Seite 54). Diese Methode ermöglicht eine tiefengestaffelte Widerstandsmessung. Die Multiring-Elektrode besteht aus neun nicht rostenden Stahlringen. Sie sind 2,5 mm dick und durch ebenfalls 2,5 mm dicke Kunststoffringe voneinander getrennt. Bei neu zu errichtenden Bauwerken werden sie am Anfang gleich miteinbetoniert. Bei schon bestehenden Bauwerken werden die Sensoren in ein Bohrloch eingebracht. Dabei wird der Zwischenraum zwischen Beton und Sensor noch mit einem Ankoppelungsmörtel gefüllt.</p> <p>Durch Anlegen einer Wechselspannung zwischen zwei nebeneinanderliegenden Ringen kann der Elektrolytwiderstand ermittelt werden. Die neun Ringe ermöglichen somit acht Widerstandsmessungen entlang einer Tiefe von 7 bis 42 mm. Der gemessene Widerstand ist jedoch ein Absolutwert, der von der Geometrie und der Lage der Elektroden abhängig ist. Um einen von der Messmethode unabhängigen Widerstand zu erhalten, wird die Zellkonstante (=Geometriekonstante) k benötigt. Sie wurde experimentell und durch numerische Simulation bestimmt und beträgt 0,1 m. Der spezifische Widerstand ist nun das Produkt der Zellkonstante mit dem absoluten Widerstand.</p> <p>Ein geringer Widerstand lässt auf einen hohen Feuchtegehalt schließen. Die Messwerte werden durch eine Messelektronik abgefragt und gespeichert. Die Multiring-Elektrode ist daher für eine längerfristige Überwachung von Feuchtigkeit bei Betonbauwerken sehr gut geeignet.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Messung werden Sensoren, Analog/Digital-Wandler und Logger benötigt.
Einflussgrößen	Temperatur, Salzgehalt
Aufwand und Kosten	aufwendig; zirka 300 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A. k.A. k.A.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Institut für Bauforschung der RWTH Aachen

3.2.3 Kapazitives Verfahren

([11] [44] [64] [65] [66] [67] [70])



Messverfahren	elektrisch - dielektrisches Verfahren - kapazitives Verfahren (Hochfrequentes Messverfahren)
Verfahrensbeschreibung	<p>Da die Dielektrizitätskonstante von Wasser erheblich größer ist als von mineralischen Baustoffen, kann anhand dieser Konstanten auf den Wassergehalt in einem Bauteil geschlossen werden. Die Dielektrizitätskonstante lässt sich jedoch nicht direkt ermitteln. Beim kapazitiven Verfahren wird daher die Kapazität eines Kondensators gemessen. Die Kapazität gibt dann einen Rückschluss auf die Konstante.</p> <p>Am Baustoff werden zwei Kondensatorplatten befestigt. Durch den angelegten Strom laden sich die Kondensatorplatten auf. Es entsteht ein elektromagnetisches Feld, wodurch die Wasserstoffatome angeregt werden und dadurch wird die Kapazität des Kondensators verändert. Wie dieser Vorgang genau vor sich geht, steht im Kapitel 2.3.2.1, Seite 41.</p> <p>Die Änderung der Kapazität ist schließlich das Maß für die Dielektrizitätskonstante und somit auch für die Feuchtigkeit.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Die Frequenz der niederfrequenten Verfahren liegt bei unter 100 MHz und bei den hochfrequenten Verfahren wird ein Frequenzbereich von über 100 MHz angewendet. In der Praxis basieren die Messgeräte hauptsächlich auf dem hochfrequenten Verfahren. Der Grund dafür ist, dass bei einer höheren Frequenz der Einfluss der Salze eliminiert werden kann. Bei niederfrequenten Verfahren werden Kalibrierungskurven für die untersuchenden Baustoffe benötigt. Der Kontakt von den Kondensatorplatten zum Material muss kontinuierlich sein.
Einflussgrößen	Salzgehalt, Temperatur, Oberflächenrauigkeit
Aufwand und Kosten	geringer Aufwand; 160 € bis 620 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 80 %; ± 0,7 %; bis zu 50 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	ATP: Hydromette Compact B; Gann: Hydromette Compact LB; Laserliner: GMI 15; PCE: PCE-WP24; Testo: Testo 616; Trotec: BM30, T650.

3.2.4 MEMS

([21] [76])



Messverfahren	elektrisch - dielektrisches Verfahren - kapazitives Verfahren - Mikro-Elektro-Mechanische System = MEMS
Verfahrensbeschreibung	<p>Das Mikro-Elektro-Mechanische System dient als Überwachungssystem. Mit Feuchtesensoren, die nach dem kapazitiven Verfahren die Feuchtigkeit messen, wird der Messwert an sogenannte Motes übergeben. Diese drahtlosen Sensorknoten senden dann die ermittelten Daten per Funk weiter an einen Zentralrechner.</p> <p>Dieses System wurde erst vor kurzem entwickelt, daher fehlen Aussagen über die Praxistauglichkeit. Grundsätzlich ist mit diesem Verfahren eine längerfristige Überwachung der Feuchtigkeit bei Betonbauwerken möglich.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Überwachung werden Feuchtesensoren, Motes und PC-s benötigt.
Einflussgrößen	-
Aufwand und Kosten	aufwendig; k.A.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A. k.A. k.A.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	TTI GmbH - TGU Smartmote, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

3.2.5 Mikrowellenmessverfahren

([61] [68] [70])



Messverfahren	elektrisch - dielektrisches Verfahren - Mikrowellenmessverfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Bei diesem Verfahren werden Mikrowellen vom Messgerät ausgesendet und wieder empfangen. Durch Absorption der hochfrequenten Wellen im Inneren des Baustoffes sowie Reflexion, Brechung und Streuung der Wellen an den Grenzschichten des Dielektrikums kommt es zur Dämpfung der Amplitude und zur Phasenverschiebung. Die empfangenen Wellen werden gemessen und die Unterschiede zu den ausgesandten berechnet.</p> <p>Die Messfrequenz liegt zwischen 0,3 und 20 GHz. Zwei Verfahren bilden die Basis für diese Messung (siehe Kapitel 2.3.2.1, Seite 41).</p> <p>Da die Messung zerstörungsfrei ist und schnell vor sich geht, werden mit diesen Geräten Flächenrastermessungen durchgeführt. Dabei werden an einem Bauteil rasterförmig Punkte ausgewählt, bei denen die Feuchtigkeit gemessen wird. Aufgrund dieser Vorgangsweise kann die Feuchteverteilung über einen größeren Bereich bestimmt werden.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Die Flächenrastermessung sollte von einem Spezialisten durchgeführt werden. Für die Auswertung der Flächenrastermessung wird eine eigene Software benötigt.
Einflussgrößen	Verschiedene Größen wie Dicke, Dichte und Körnung des Baustoffes können die Messgenauigkeit negativ beeinflussen. Liegt die Messfrequenz über 5 GHz, so wird das Messergebnis von der Ionenleitfähigkeit der Salze nicht mehr beeinflusst.
Aufwand und Kosten	Mikrowellenmessverfahren → geringer Aufwand, Flächenrastermessung → aufwendig; Mikrowellenmessgerät → 590 €, Ausrüstung für die Flächenrastermessung → 4.460 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 80 %; ± 1 % bis ± 2 %; 300 mm bis 800 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	hf sensor: Moist 100 B, Moist 210 B, Moist 300 B; Trotec: T600, Moist 100, Moist 200.

3.2.6 Time-Domain Reflektometrie

([40] [44] [71] [74] [75])



Messverfahren	elektrisch - dielektrisches Verfahren - Time-Domain Reflektometrie
Verfahrensbeschreibung	<p>Dieses Verfahren beruht auf der Geschwindigkeits- bzw. Laufzeitmessung von elektromagnetischen Wellen. Von einem Impulsgenerator wird ein hochfrequenter elektromagnetischer Impuls ausgesandt. Dieser wird über ein Koaxialkabel in die Gabelsonden geleitet. Die Gabelsonden bestehen meistens aus zwei, manchmal auch aus drei Leiterstäben, die in Bohrlöchern eingebracht sind. Um die Leiter entsteht ein elektromagnetisches Feld, welches von der Dielektrizitätskonstante des Wassers beeinflusst wird.</p> <p>Dies hat mit der Eigenschaft der Wasserstoffdipole zu tun, die sich an einem von außen angelegten elektrischen Feld ausrichten. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld in die entgegengesetzte Richtung und dämpft die Geschwindigkeit des Impulses.</p> <p>Am Ende der Leiter wird der Impuls reflektiert. An einem Oszilloskop wird das ausgesandte Signal mit dem reflektierten verglichen und gibt Auskunft über die Laufzeit und Amplitude des Signals. Damit können die Dielektrizitätskonstante und somit auch die Feuchtigkeit bestimmt werden. Das Verfahren ist dem Mikrowellenmessverfahren sehr ähnlich und eignet sich auch für Langzeitmessungen.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Messung werden Zeitbereichsreflektometer, Oszilloskop, Koaxialkabel und Gabelsonden benötigt.
Einflussgrößen	Temperatur, Salzgehalt und Reflexion an Inhomogenitäten
Aufwand und Kosten	aufwendig; 10.000 € bis 25.000 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; ± 1 % bis ± 2 %; 30 bis 50 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	IMKO: Trime-ES

3.2.7 Impuls-Radar-Verfahren

([40] [44] [71] [73])

Messverfahren	elektrisch - dielektrisches Verfahren - Impuls-Radar-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Dieses Verfahren beruht auf der Geschwindigkeits- bzw. Laufzeitmessung von elektromagnetischen Wellen. Von einem Impulsgenerator wird ein hochfrequenter elektromagnetischer Impuls ausgesandt und von einer Empfangsantenne wieder aufgenommen. Der Frequenzbereich liegt dabei zwischen 500 MHz und 2,5 GHz. Das Ergebnis wird als Kurve auf einem Monitor dargestellt.</p> <p>Die Dielektrizitätskonstante beeinflusst, wie bereits beim TDR-Verfahren ersichtlich (siehe Kapitel 3.2.6, Seite 59), die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Daher kann mit der Messung der Feuchtegehalt bestimmt werden. Mit dem Impuls-Radar-Verfahren lassen sich laut [44] <i>nur relativ grobe, integrale Werte der Bauteilfeuchte über ein bestimmtes Messvolumen bestimmen</i>. Lokale Feuchtenester können eher nicht geortet werden.</p> <p>Das Impuls-Radar-Verfahren wird nicht nur zur Bestimmung der Feuchtigkeit verwendet, sondern primär zur Strukturerkundung oder Bewehrungsortung.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	-
Einflussgrößen	Elektrische Eigenschaften der durchstrahlten Medien, Temperatur, Salzgehalt, Frequenzbereich und Reflexion an Inhomogenitäten
Aufwand und Kosten	aufwendig; Impuls-Radar-Geräte sind selten zu erwerben. In der Praxis bieten Firmen die Geräte mit geschultem Personal an. Bei einem Kauf muss mit 25000 € bis 100000 € gerechnet werden.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A.; ± 1 % bis ± 3 %; Je höher die Frequenz ist, desto geringer ist die Eindringtiefe.
Regelwerke	DGZfP-Merkblatt über das Radar-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, 2001
Hersteller und Geräte	GeoBau-Controlling GmbH

3.2.8 Kernspinresonanz-Verfahren

([19] [40] [44] [72])



Messverfahren	elektrisch/radiometrisch - Kernspinresonanz-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Normalerweise wird dieses Verfahren in einem Labor durchgeführt, d.h., es handelt sich hierbei um ein zerstörendes Verfahren. Aber heutzutage gibt es auch schon Geräte, die im Freien verwendet werden können und somit zerstörungsfrei arbeiten.</p> <p>Bei der Nuklearen-Magnetischen-Resonanz-Methode, kurz NMR-Methode, wird die Eigenrotation der positiv geladenen Wasserstoffkerne ausgenutzt. Durch diese Fähigkeit können die Wasserstoffatome ein magnetisches Feld bilden, das für dieses Verfahren benötigt wird.</p> <p>An das Untersuchungsobjekt wird mittels einem U-förmigen Magneten ein Magnetfeld angelegt, an dem sich die Wasserstoffkerne ausrichten. Danach wird ein elektromagnetischer Impuls eingestrahlt. Die Wasserstoffkerne nehmen diese Energie auf und geben nach Beendigung des Impulses die Energie auch wieder ab (siehe Kapitel 2.3.2.2, Seite 43). Anhand der abgegebenen Energie und der dafür benötigten Zeit kann die Anzahl der Wasserstoffkerne bestimmt werden. Dadurch ist ein Rückschluss auf den Wassergehalt möglich. Es wird das gesamte Wasser im Baustoff gemessen, auch das chemisch gebundene.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Verwendung am Bauwerk selbst wird ein Aufsatz für das Messgerät benötigt. Ansonsten kann die Messung nur in einem Labor erfolgen.
Einflussgrößen	Gehalt an ferromagnetischen Substanzen
Aufwand und Kosten	sehr aufwendig; Die Geräte für dieses Verfahren gibt es kaum zu kaufen. Meistens bieten Firmen die Feuchtemessung an. Dabei werden Kosten für das Gerät sowie für die Arbeitsstunden verrechnet. Bei einem Kauf kann mit 25.000 € bis 75.000 € gerechnet werden.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; k.A.; 2 mm bis 30 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Q-Net: NMR Inspect

3.2.9 Neutronenstrahlungs-Verfahren

([23] [40] [44] [53] [71] [81])



Messverfahren	radiometrisch - Neutronenstrahlungs-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>In der Praxis gibt es Oberflächensonden und Tauchsonden. Bei der Oberflächensonde befindet sich der Detektor sowie das Gerät zur Ausstrahlung der Neutronen mit einem gewissen Abstand zueinander an der Oberfläche. Bei der Tauchsonde wird ein Sensor für Messzwecke in ein 5 - 7 cm breites Bohrloch gesteckt (siehe Kapitel 3.2.9, Abbildung 2.19, Seite 44).</p> <p>Das Verfahren nutzt die Wechselwirkung zwischen feuchtem Material und Kernstrahlung aus. Die Neutronen werden durch α-Strahler oder β-Strahler und Beryllium erzeugt. Sie besitzen eine hohe kinetische Energie und sind somit sehr schnell. Mit der Sonde werden die Neutronen in den Baustoff eingestrahlt und treffen dort auf die Wasserstoffatome.</p> <p>Bei dem Zusammenstoß geben die Neutronen den Atomkernen der Wasserstoffatome Energie ab und werden langsamer (siehe Kapitel 3.2.9, Seite 62). Die Neutronen werden nun mit einem Detektor gemessen. Dabei gibt die ermittelte Intensität der Neutronen Auskunft über die vorhandenen Wasserstoffatome und somit auch über die Feuchte im Baustoff. Dieses Verfahren erfasst aber zusätzlich das chemisch gebundene Wasser.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Wegen der Radioaktivität ist ein Strahlenschutz erforderlich. Außerdem wird für die Anwendung und den Transport eine behördliche Genehmigung benötigt. Die Untersuchung selbst kann nur von speziell geschultem Personal durchgeführt werden. Die Messgeräte müssen bei der Kalibrierung den Wasserstoffanteil des trockenen Baustoffes berücksichtigen. Bei der Verwendung einer Tauchsonde muss vor der Messung ein Bohrloch gebohrt werden.
Einflussgrößen	Dichte des Materials
Aufwand und Kosten	sehr aufwendig; Neutronensonden gibt es kaum zu kaufen. Meistens bieten Firmen die Feuchtemessung mit dem Gerät an. Dabei werden Kosten für die Sonde sowie für die Arbeitsstunden verrechnet. Bei einem Kauf muss mit 5.000 € aufwärts gerechnet werden.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 20 %; $\pm 0,5$ %; Oberflächensonden → bis zu 200 mm, Tauchsonden → ab 250 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Troxler Electronics GmbH

3.2.10 Gamma-Strahlungs-Verfahren

([23] [40] [44] [71] [81])

Messverfahren	radiometrisch - Gamma-Strahlungs-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	Zur Erzeugung der γ -Strahlung werden die Elemente Americium, Kobalt und Cäsium verwendet. Die Strahlung wird durch den Baustoff geschickt. Aufgrund der Schichtdicke, der Dichte des Materias sowie des Absorptionskoeffizienten nimmt die Stahlung ab. Es wird die Intensität der γ -Strahlung vor und nach der Transmission gemessen. Mit diesen Daten kann dann die Gesamtdichte bestimmt werden. Durch Abziehen der Dichte des Baustoffes im trockenen Zustand kann die Feuchte ermittelt werden.
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Es werden verschiedene Gamma- und Neutronenquellen zur Erzeugung der Gamma-Strahlung benötigt sowie ein Gamma-spektrometer als Detektor. Außerdem wird für dieses Verfahren eine Genehmigung benötigt. Die Kenntnis über die Trockenroh-dichte muss gegeben sein.
Einflussgrößen	Inhomogenität im Baustoff
Aufwand und Kosten	sehr aufwendig; Geräte für das Gamma-Strahlungs-Verfahren gibt es am derzeitigen Markt kaum zu kaufen und werden nur von wenigen Firmen angeboten.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A.; k.A.; bis 500 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Troxler Electronics GmbH

3.2.11 Infrarotemissions-Verfahren

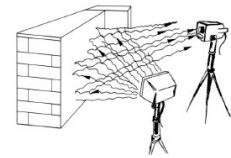
([9] [10] [36] [40] [44] [71])



Messverfahren	optisch - Infrarotemissions-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Mit einer Infrarotkamera können langwellige Wärmestrahlungen aufgenommen werden. Da die Bauteile elektromagnetische Strahlung im infraroten Bereich aussenden, kann diese Methode zur Ermittlung der Oberflächentemperatur von Bauteilen verwendet werden. Am aufgenommenen Wärmebild, dem sogenannten Thermogramm, sind dann die verschiedenen Oberflächentemperaturen anhand unterschiedlicher farblicher Flächen zu erkennen. Eine abgesenkte Oberflächentemperatur kann ein Indiz für Baustofffeuchte sein (siehe Kapitel 2.3.2.4, Seite 45).</p> <p>Die Oberflächentemperatur wird aber noch aufgrund anderer Faktoren beeinflusst, z.B. konstruktive Wärmebrücken, Inhomogenität des Baustoffes oder Verschattungen. Daher kann mit dem Ergebnis nur eine grobe, qualitative Aussage über den Feuchtegehalt des Bauteils gemacht werden.</p> <p>Es gibt mehrere Methoden der Infrarotmessung. So gehören in diesen Bereich auch die Infrarot-Reflektografie (siehe Kapitel 3.2.12, Seite 65), der Infrarot-Strahlungsthermometer, die Lock-In-Thermografie und die Transient-Thermografie.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Es wird ein Programm für die Bildverarbeitung benötigt.
Einflussgrößen	Sonnenstand, Witterungsbedingungen, Spiegelungen, Emissivität der Oberfläche
Aufwand und Kosten	geringer Aufwand; ab 3.500 € aufwärts.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; ± 1,5 % bis ± 2 %; nur unmittelbar an der Oberfläche.
Regelwerke	ÖNORM EN 13187, DGZfP-Merkblatt für thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken, 1993
Hersteller und Geräte	ATP: Infrarot-Thermometer; Laserliner: GIM 350 MS; Messbar: Testo 881-3, Fluke Ti10; PCE: Infrarotkamera PCE-TC 6.

3.2.12 Infrarotreflexions-Verfahren

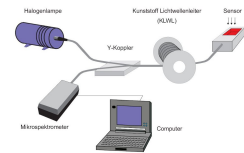
([9] [10] [40] [44] [71])



Messverfahren	optisch - Infrarotreflexions-Verfahren
Verfahrensbeschreibung	<p>Im Gegensatz zur Infrarot-Thermografie (siehe Kapitel 3.2.11, Seite 64) wird hier die zu untersuchende Fläche zusätzlich mit Infrarotlicht bestrahlt. Mit der Kamera wird nun sowohl die Wärmestrahlung des Objektes aufgenommen als auch die reflektierende Infrarotstrahlung.</p> <p>Um eine besonders starke Absorption des Lichtes vom Wasser zu erreichen, wird die Wellenlänge der Strahlung reduziert. Dies geschieht bei einem Frequenzbereich von 2000 - 5000 nm. Für die Bilderstellung werden dann auch spezielle Kameras benötigt, die eine Aufnahme in einem größeren Frequenzbereich, nämlich von 2000 - 12000 nm, ermöglichen. Mit dieser Methode lässt sich daher eine gute Aussage über die Feuchteverteilung im Bauteil treffen.</p> <p>Für die Messung wird kein Kontakt zum Baustoff benötigt. Die Aufnahme mit der Kamera kann auch aus weiter Ferne erfolgen. Das Verfahren dient vor allem für einen schnellen, qualitativen Überblick über große Flächen.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Durchführung der Messung wird eine Infrarotkamera, ein Infrarotfilter sowie eine Infrarotlichtquelle benötigt. Das Verfahren kann nur von geschultem Personal durchgeführt werden.
Einflussgrößen	Witterungsbedingungen, Oberflächenbeschaffenheit, inhomogene Emissivität der Oberfläche
Aufwand und Kosten	aufwendig; 30.000 € bis 250.000 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	0 % bis 100 %; k.A.; nur unmittelbar an der Oberfläche.
Regelwerke	DGZfP-Merkblatt für thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken, 1993
Hersteller und Geräte	InfraTec GmbH; FLIR Systems GmbH.

3.2.13 Faseroptische Feuchtesensoren

([7] [56])



Messverfahren	optisch - Faseroptische Feuchtesensoren
Verfahrensbeschreibung	<p>Bei dieser Methode werden Sensoren mit einbetoniert oder nachträglich in ein Bohrloch eingeführt. Aufgrund des vollständigen reversiblen Verhaltens des Sensors ist dieses Verfahren vor allem auch für eine längerfristige Überwachung der Feuchtigkeit in einem Bauwerk geeignet.</p> <p>Der Sensor ist von einer Polymermatrix umgeben. In dieser befindet sich ein organischer solvatochromer Farbstoff. Der sogenannte Reichardts Farbstoff hat die Eigenschaft, dass sich die Farbe in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Lösungsmittels ändert. Dies ist auf das ausgeprägte Dipolmoment des Farbstoffes zurückzuführen. Bei Kontakt mit Wasser kommt es nun durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungskräften zu einer Änderung des Energieniveaus. Wenn nun Wasser in den Baustoff eindringt, verändert sich die Polarität in der Umgebung des Farbstoffes. Dies führt zu einer Verschiebung des Absorptionsspektrums in einen kurzwelligeren, energiereicheren Bereich des elektromagnetischen Spektrums.</p> <p>Um das Ganze zu erfassen, wird mit einer breitbandigen Lichtquelle durch eine Faser dem Sensor das Licht zugeführt. Anhand eines integrierten Spiegels im Sensor wird das Licht wieder durch die Faser zurückgeschickt und mit einem Mikrospektrometer gemessen. Im trockenen Zustand befindet sich das Absorptionsmaximum der Polymermatrix bei 602 nm. Ist Wasser im Baustoff vorhanden, liegt das Maximum bei einer geringeren Wellenlänge. So kann nun durch das Absorptionsspektrum des reflektierten Lichtes auf den Wassergehalt geschlossen werden.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	Für die Messung werden Lichtquelle, Mikrospektrometer, Faser und Sensor benötigt.
Einflussgrößen	-
Aufwand und Kosten	aufwendig; hohe Anschaffungskosten, aber geringe Instandhaltungskosten.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A. k.A. k.A.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Technische Universität Braunschweig

3.2.14 Wärmeleitfähigkeits-Verfahren

([22] [23] [40] [44] [71])



Messverfahren	thermisch - Wärmeleitfähigkeits-Verfahren (Lambda-Sonde)
Verfahrensbeschreibung	<p>Die Sondenmethode wird mit einem elektrischen Widerstandsdraht, der mit Temperaturfühlern ausgestattet ist, durchgeführt. Die 120 mm lange und 1,5 mm dicke Sonde wird in das Material eingestochen. Bei härterem Material ist gegebenenfalls vorzubohren. Die Messung dauert ungefähr 10 Minuten. Die Messwerte umfassen einen Bereich von 0,02 - 0,2 W/(m*K).</p> <p>Durch die Erhitzung des Drahtes wird an den Baustoff Energie abgegeben. Anschließend kühlt der Draht wieder ab. Der zeitliche Ablauf von Erhitzung und Abkühlung gibt Auskunft über die Wärmeleitfähigkeit. Nachdem der Baustoff aber nur leitfähig ist, wenn Wasser vorhanden ist, lässt sich somit eine Aussage über den Feuchtegehalt machen.</p> <p>Die Messung kann aufgrund der Möglichkeit, den Heizdraht mit mehreren Temperaturfühlern auszustatten, in unterschiedlichen Tiefen erfolgen. Die Sondenmethode eignet sich auch für längere Einsätze.</p>
Voraussetzungen für die Messdurchführung	-
Einflussgrößen	Bei Bohrungen kann es aufgrund der Erhitzung zu einem falschen Ergebnis kommen. Außerdem kann das Aufheizen des Drahtes das Feuchteprofil beeinflussen.
Aufwand und Kosten	aufwendig; 700 € bis 2.000 €.
Messbereich, Messgenauigkeit und Messtiefe	k.A.; k.A.; bis zu 120 mm.
Regelwerke	keine
Hersteller und Geräte	Ahlborn Mess- und Regelungstechnik

3.3 Vergleichende Bewertung

Für ein Überwachungssystem zur Feuchtemessung, wie es sich die Firma Arcon Bauwerkssicherheit GmbH vorstellt, würden von den zuvor beschriebenen Messgeräten und -verfahren folgende in Betrachtung kommen:

- Multiring-Elektrode;
- Mikro-Elektro-Mechanische System;
- Mikrowellenmessverfahren als Flächenrastermessung;
- Time-Domain Reflektometrie und
- faseroptischer Feuchtesensor.

Die restlichen Geräte und Verfahren eignen sich nicht für eine längerfristige Überwachung der Feuchtigkeit und werden daher nicht in den nachstehenden Vergleich mit einbezogen.

Das Mikrowellenmessverfahren als Flächenrastermessung wäre das einzige Verfahren, bei dem es nicht nötig ist, einen Sensor mit einzubetonieren oder später in ein Bohrloch einzuführen. Jedoch müsste jede Messung immer wieder von einer Person händisch durchgeführt werden. Dies ist natürlich aufwendig, lässt aber die Möglichkeit offen, dass die Messpunkte geändert werden können.

Bei den anderen vier Verfahren muss das Gerät bzw. der Sensor schon am Anfang miteinbetoniert werden oder nachträglich in ein Bohrloch gegeben werden. Bei der Multiring-Elektrode und der Time-Domain Reflektometrie ist es notwendig, dass die Messstelle zugänglich ist, da die Datenübertragung über Kabel verläuft. Die Datenübertragung hingegen bei dem Mikro-Elektro-Mechanischen System und dem faseroptischen Feuchtesensor funktioniert kabellos. Die ermittelten Daten werden über Funk an einen Rechner geschickt. Die zwei Varianten haben folgende Vor- und Nachteile:

Multiring-Elektrode und Time-Domain Reflektometrie:

- + Die Überwachung kann beliebig lange erfolgen.
- Die Messstelle muss frei zugänglich sein.

Mikro-Elektro-Mechanische System und faseroptischer Feuchtesensor:

- + Die Messstelle kann ohne zusätzlichen Bedingungen gewählt werden.
- Für die Funkübertragung werden Batterien oder Akkus benötigt, die sich nach einer gewissen Zeit entladen.

Aus den oben erwähnten Gründen erscheint die Multiring-Elektrode oder der faseroptische Feuchtesensor am geeignetsten als Überwachungssystem.

3.4 Checkliste zur Auswahl geeigneter Messgeräte und Messverfahren

Die Checkliste lässt sich in zwei Spalten teilen. Die erste Spalte bildet die Kategorisierung der Messverfahren und in der zweiten Spalte befinden sich die Auswahlkriterien. Aufgrund der großen Anzahl von Kriterien wird die Checkliste aus Platzgründen auf zwei Seiten dargestellt.

Die Messverfahren werden nach Ergebnis, Messmethode und Messverfahren kategorisiert. In Anlehnung an [23] wird unter dem Punkt „Ergebnis“ zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren unterschieden. Unter „Messmethoden“ wird das zugrundegelegte Prinzip des jeweiligen Messverfahrens angegeben. In der Kategorie „Messverfahren“ erfolgt die Auflistung der Verfahren ebenfalls in Anlehnung an [23] (siehe Kapitel 2.3, Abbildung 2.14, Seite 37).

Der erste Teil der Checkliste beinhaltet Angaben über die Anwendung des jeweiligen Verfahrens (Aufwand, Ausführung, Überwachung, Mobilität und Prüfverfahren) und der zweite Teil enthält Informationen über die technischen Daten der einzelnen Messgeräte (Messbereich, Messgenauigkeit, Eindringtiefe und Kosten). Fehlen bei einem Gerät diese technischen Daten, so wird dies mit der Abkürzung „k.A.“ für „keine Angaben“ erkenntlich gemacht. Aufgrund der Tatsache, dass es unterschiedliche Modelle von Messgeräten gibt, die mit demselben Messprinzip arbeiten, können z.B. bei der Auswahl für „Messbereich“ mehrere Möglichkeiten zutreffen.

Der Checkliste werden insgesamt neun Auswahlkriterien zu Grunde gelegt. Zum besseren Verständnis sind in Abbildung 3.1, Seite 69 die ausgewählten Kriterien aufgelistet. Auf den nachfolgenden Seiten werden diese Kriterien näher beschrieben.

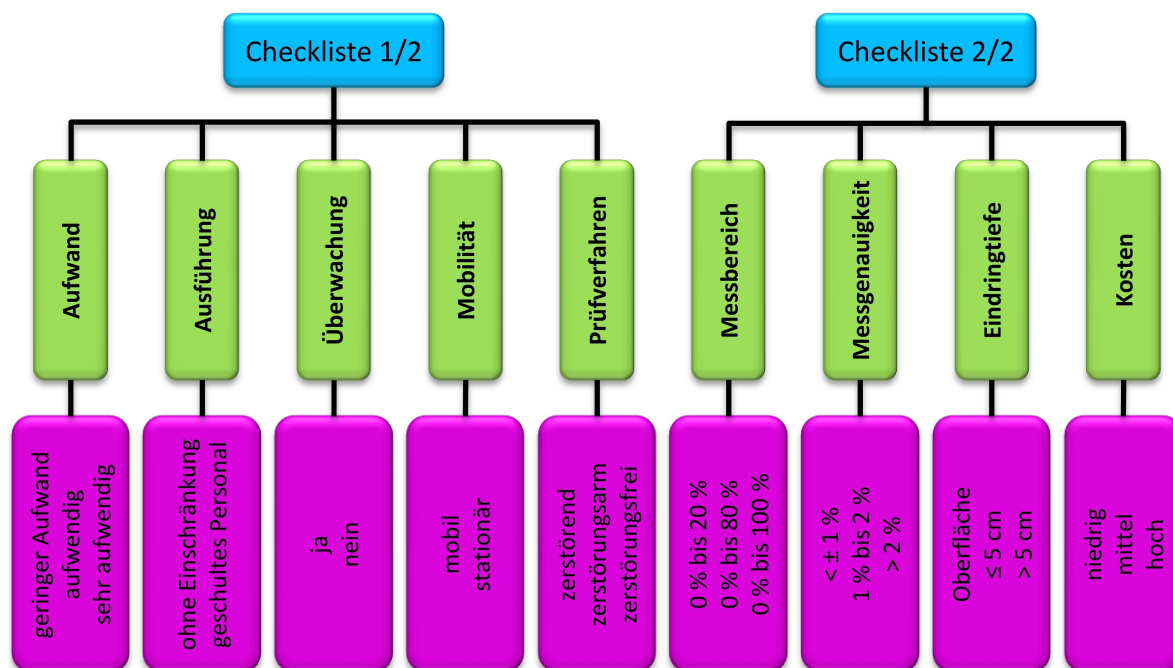


Abbildung 3.1: Auswahlkriterien für die Checkliste

3.4.1 Aufwand

Unter diesem Punkt wird definiert, wie aufwendig ein Verfahren ist. So müssen bei manchen Messungen zum Beispiel Vorkehrungen getroffen werden (Probeentnahmen, Genehmigungen). Anhand dieser Überlegungen gibt es drei Unterteilungen:

- **geringer Aufwand:** Das Verfahren ist wenig zeitaufwendig, einfach in der Handhabung und benötigt wenige Hilfsmittel.
- **aufwendig:** Diese Verfahren sind zeitaufwendig und erfordern zusätzliche Geräte. Für die Durchführung ist eine Einschulung, geschultes Fremdpersonal bzw. ein eigener Techniker notwendig.
- **sehr aufwendig:** Diese Messungen können nur noch von Spezialisten durchgeführt werden und benötigen aufwendigere Maßnahmen (z.B.: Strahlenschutz beim Neutronenstrahlungs-Verfahren) zur Durchführung der Messung.

3.4.2 Ausführung

In der Tabelle wird dieses Kriterium mit „Ausf.“ abgekürzt. Bei manchen Geräten wird ein geschultes Personal benötigt, da für das Verfahren eine bestimmte technische Kenntnis vorausgesetzt wird. Bei anderen Geräten reicht es, wenn die Anleitung dazu gründlich durchgelesen wird. Daher gibt es hier zwei Möglichkeiten:

- **ohne Einschränkung** und
- **geschultes Personal.**

3.4.3 Überwachung

Unter Überwachung (in der Tabelle unter „Überw.“ zu finden) ist zu verstehen, dass mit dem Gerät/Verfahren eine längerfristige Überwachung der Feuchtigkeit an einem Bauwerk möglich ist. Es gibt folglich nur die Wahl zwischen:

- **ja:** Überwachung ist möglich und
- **nein:** Überwachung ist nicht möglich.

3.4.4 Mobilität

Dieser Punkt (in der Tabelle unter „Mobili.“ zu finden) ist nur zu beachten, wenn bei Überwachung ein „ja“ angekreuzt wurde. Hier wird nämlich auf die Ausführung der jeweiligen Überwachungssysteme eingegangen. Bei den meisten wird das Objekt für die Feuchtigkeitsmessung im Bauwerk mit einbetoniert oder nachträglich in ein Bohrloch eingeführt. Bei wenigen Messverfahren ist dies aber nicht notwendig, da die Feuchtigkeit ortsunabhängig gemessen werden kann. Damit lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

- **mobil:** die Feuchtigkeitsmessung ist ortsunabhängig und
- **stationär:** die Feuchtigkeitsmessung kann nur bei bestimmten Messpunkten erfolgen.

3.4.5 Prüfverfahren

Dieses Kriterium wird in der Tabelle mit „Prüfverf.“ abgekürzt und sagt aus, wie stark das Bauteil bei der Untersuchung beansprucht wird. Wird eine Probe benötigt, so wird dem Bauteil Material entnommen und es bleibt ein Eingriff optisch ersichtlich. Einerseits kann auch ohne größeren Aufwand und Beschädigung ein Messobjekt in das Material eingeführt werden und andererseits reicht für die Messung der bloße Kontakt zur Oberfläche des untersuchenden Teils aus. Je nach Hersteller funktioniert das jeweilige Feuchtemessgerät nach einem bestimmten Prüfverfahren. Die Prüfverfahren lassen sich somit in drei Kategorien unterteilen:

- **zerstörend,**
- **zerstörungsarm** und
- **zerstörungsfrei.**

3.4.6 Messbereich

Dies ist der Bereich des vom Messgerät erfassbaren relativen Feuchtegehaltes, in dem die Messabweichungen innerhalb der festgelegten Grenzen bleiben. Wird in einem anderen Bereich gemessen, gibt es keine Garantie mehr für die Zuverlässigkeit des Ergebnisses. Die Untergliederung erfolgt in:

- **0 % bis 20 %,**
- **0 % bis 80 %** und
- **0 % bis 100 %.**

3.4.7 Messgenauigkeit

Die vom Hersteller angegebene Messabweichung hat nur im festgelegten Messbereich Gültigkeit. Je kleiner die Messabweichung ist, desto genauer ist das Ergebnis. In der Tabelle ist dieser Punkt mit „Messgenauig.“ abgekürzt. Bei den Messgeräten für die Feuchtigkeit lassen sich drei Gruppen bilden:

- **< 1 %,**
- **1 % bis 2 %** und
- **> 2 %.**

3.4.8 Eindringtiefe

Die Eindringtiefe gibt den erfassbaren Messbereich des Gerätes zur Feuchtemessung im Bauteil an. Eine Ausnahme bilden hier die Systeme, die auch für die Bauwerksüberwachung verwendet werden, da hier die Objekte zur Feuchtigkeitsüberprüfung mit einbetoniert werden. Die Eindringtiefe lässt sich ebenfalls in drei Gruppen unterteilen:

- **Oberfläche,**
- $\leq 5 \text{ cm}$ und
- $> 5 \text{ cm}$.

3.4.9 Kosten

Dieser Punkt dient nur zur groben Orientierung des finanziellen Aufwandes. Unter Kosten werden die Anschaffungskosten des Gerätes oder die Mietkosten für das Gerät sowie für das Personal verstanden. Die Einteilung erfolgt in:

- **niedrig:** $\leq 1.000 \text{ €}$,
- **mittel:** 1.000 € bis 25.000 € und
- **hoch:** $\geq 25.000 \text{ €}$.

Tabelle 3.2: Checkliste für die Auswahl des Messverfahrens 1/2

Kategorisierung der Messverfahren		Kriterien												
		Aufwand			Ausf.		Überw.		Mobili.		Prüfverf.			
Ergebnis	Messmethode	Messverfahren	geringer Aufwand	aufwendig	sehr aufwendig	ohne Einschränkung	geschultes Personal	ja	nein	mobil	stationär	zerstörend	zerstörungssarm	zerstörungsfrei
quantitativ	thermogravimetrisch	Trockenschrankverfahren		x			x		x			x		
	analytisch	Calciumcarbid-Verfahren		x			x		x			x		
qualitativ	elektrisch	Leitfähigkeitsmessverfahren	x			x					x			x
		Multiring-Elektrode		x								x		x
		Kapazitives Verfahren	x			x								x
		MEMS		x								x		x
		Mikrowellenmessverfahren	x				x							x
		Flächenrastermessung		x							x			x
	radiometrisch	Time-Domain Reflektometrie		x								x		
		Impuls-Radar-Verfahren		x										x
		Neutronenstrahlungs-Verfahren			x									x
	elektr./radiometr. optisch	Gamma-Strahlungs-Verfahren			x									x
		Kernspinresonanz-Verfahren			x								x	
		Infrarotemissions-Verfahren	x				x							x
		Infrarotreflexions-Verfahren		x										x
thermisch	Faseroptischer Feuchtesensor		x								x		x	
	Wärmeleitfähigkeits-Verfahren		x										x	

Tabelle 3.3: Checkliste für die Auswahl des Messverfahrens 2/2

Kategorisierung der Messverfahren		Kriterien													
		Messbereich			Messgenauig.		Eindringtiefe		Kosten						
Ergebnis	Messmethode	0 % bis 20 %	0 % bis 80 %	0 % bis 100 %	> ± 1 %	± 1 % bis ± 2 %	< ± 2 %	Oberfläche	< 5 cm	> 5 cm	niedrig	mittel	hoch		
	Messverfahren				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
quantitativ	thermogravimetrisch														
	analytisch														
	elektrisch	Trockenschrankverfahren													
		Calciumcarbid-Verfahren													
		Leitfähigkeitsmessverfahren	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Multiring-Elektrode	k.A.												
		Kapazitives Verfahren	x	x		x									
		MEMS	k.A.												
		Mikrowellenmessverfahren		x											
		Flächenrastermessung		x											
		Time-Domain Reflektometrie			x										
		Impuls-Radar-Verfahren	k.A.												
	radiometrisch	Neutronenstrahlungs-Verfahren	x												
		Gamma-Strahlungs-Verfahren													
Kernspinresonanz-Verfahren				x											
Infrarotemissions-Verfahren				x											
optisch	Infrarotreflexions-Verfahren			x											
	Faseroptischer Feuchtesensor	k.A.													
thermisch	Wärmeleitfähigkeits-Verfahren	k.A.													

3.5 Zusammenfassung

In der Praxis werden auf dem elektrischen Verfahren basierende Messgeräte am häufigsten eingesetzt. Mit diesen können nur qualitative Aussagen über den Feuchtegehalt im Baustoff gemacht werden. Für quantitative Aussagen werden hingegen von den Herstellern die Trockenschrankmethode oder das Calciumcarbid-Verfahren empfohlen.

Die zur Gliederung der Checkliste zugrundegelegte Kategorisierung der Messverfahren nach [23] wurde um neu entwickelte Messverfahren (Multiring-Elektrode, MEMS, Time-Domain Reflektometrie, Impuls-Radar-Verfahren und faseroptischer Feuchtesensor) ergänzt.

Des Weiteren wird in der Checkliste das Mikrowellenmessverfahren in eine Punktmessung und Flächenrastermessung unterteilt.

Zu den neu entwickelten Verfahren (Multiring-Elektrode, MEMS und faseroptischer Sensor) gibt es aufgrund geringer Erfahrungswerte wenige oder gar keine Informationen bezüglich der Auswahlkriterien im zweiten Teil der Checkliste (z.B.: Messbereich, Kosten). Ebenso waren kaum Informationen über das Impuls-Radar-, Gamma-Strahlungs- und Wärmeleitfähigkeits-Verfahren erhältlich, da diese in der Praxis selten zur Anwendung kommen.

Kapitel 4

Schadenshäufigkeit und -ausmaß

In diesem Kapitel werden Schadensfälle im Bauwesen bezogen auf Österreich näher betrachtet. Die verwendeten Daten wurden größtenteils aus den drei Österreichischen Bauschadensberichten herangezogen. Während der 1. Bauschadensbericht die Schäden in Österreich allgemein betrachtet, befassen sich der 2. und 3. Teil speziell mit den von Wasser beanspruchten Bauteilgruppen. Es werden auch Statistiken aus Deutschland verwendet, da dort genauere Untersuchungen bezüglich der Schäden im Bauwesen durchgeführt wurden und für einen Vergleich mit österreichischen Verhältnissen geeignet sind.

Anfangs werden die schadensbetroffenen Bauteile besprochen. Anhand von Statistiken wird hier gezeigt, dass die Schäden aufgrund von Wasser einen hohen Prozentsatz ausmachen. Die Schadensbilder werden mit den möglichen Ursachen und den einsetzbaren Messgeräten zur Bestimmung der Feuchtigkeit tabellarisch aufgelistet. Anschließend werden die Schadensursachen näher betrachtet. Abschließend wird das zeitliche Auftreten der Schäden näher erläutert und eine Übersicht über jene Geldbeträge im Bauwesen gegeben, die zur Sanierung aufgewendet werden.

4.1 Schadensbetroffene Bauteile

Im 1. Österreichischen Bauschadensbericht wurde eine Erhebung durchgeführt, um die schadensbetroffenen Bauteile zu ermitteln [3]. Dabei werden sechs Bauteilgruppen vorgegeben: [3]

- Dächer/Balkone;
- Erdberührte Bauteile;
- Innenbauteile (z.B.: Innenwände, Fußböden);
- Sonstige Bauteile (z.B.: Außenanlagen);
- Tragstruktur, Außenwände und Fenster und
- Vertikale Erschließungen (z.B.: Stiegen, Aufzüge).

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.1, Seite 78 zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bauteilkategorien „Dächer/Balkone“ und „Erdberührte Bauteile“ zusammen schon 50 % der Schäden ausmachen. Dies sind auch genau jene Bauteile, welche von Wasser besonders stark beansprucht werden. Die anderen Gruppen sind weniger von Schäden betroffen und bilden die restlichen 50 %. [3]

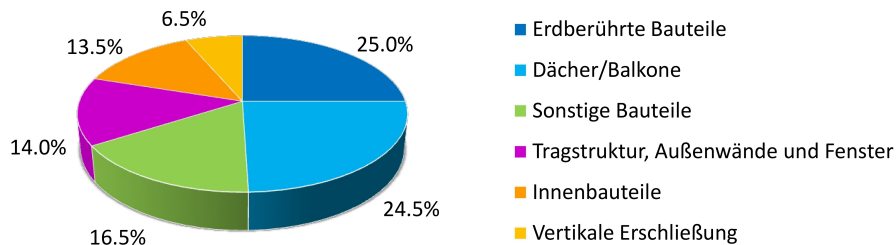


Abbildung 4.1: Schadensbetroffene Bauteile nach [3]

Aber auch bei den weniger von Wasser beanspruchten Bauteilen spielt Feuchtigkeit immer wieder eine Rolle. So ist laut einer deutschen Umfrage das Hauptproblem von Schäden bei Innenwänden die Feuchtigkeit (siehe Abbildung 4.2, Seite 78). [55]

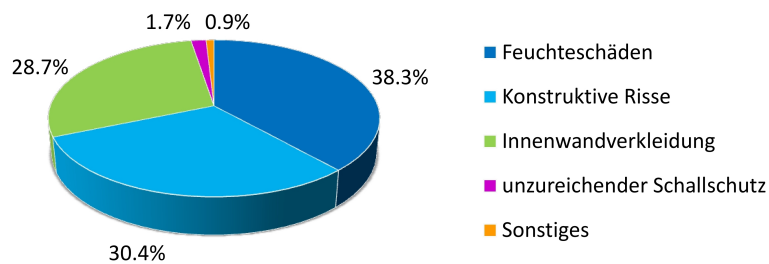


Abbildung 4.2: Unterteilung von Baumängeln/-schäden an der Bauteilgruppe Innenwände nach [55]

Aufgrund der hohen Schadensanfälligkeit von erdberührten Bauteilen, Dächern und Balkonen wurde der 2. Österreichische Bauschadensbericht und der 3. Österreichische Bauschadensbericht initiiert, wobei im 2. auf Abdichtungen bei erdberührten Bauteilen und im 3. auf Abdichtungen bei Flachdächern, Balkonen und Terrassen eingegangen wird. [1] [2]

Durch die Entstehung des 3. Österreichischen Bauschadensberichtes konnten weitere Untersuchungen durchgeführt werden und es konnte eine genauere Einteilung der Schäden von der Bauteilkategorie „Dächer/Balkone“ erfolgen (siehe Abbildung 4.3, Seite 79) [2]. Es wurde von [2] eine Unterteilung in sechs mögliche Mängel-/Schadensbereiche vorgenommen:

- Beschädigung der Abdichtung während der Bauphase;
- Mangelhafte Gefälleausbildung;
- Mängel/Schäden an Abläufen/Gullys;
- Mängel/Schäden an Hochzügen;
- Mängel/Schäden bei Durchdringungen und
- Mängel/Schäden bei Türanschlüssen

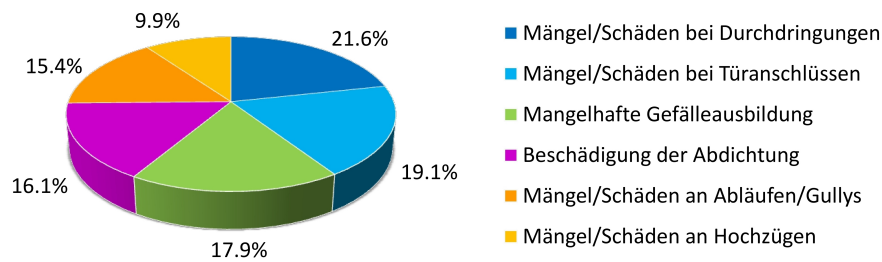


Abbildung 4.3: Mängel/Schäden an Abdichtungen von Flachdächern, Balkonen und Terrassen nach [2] verändert

Auch in Deutschland gab es Erhebungen bezüglich Schadensfälle im Bauwesen. Diese können sehr gut mit den österreichischen verglichen werden. Die Abbildung 4.4, Seite 79 zeigt eine Unterteilung von Baumängeln und -schäden von Dächern in Deutschland [55]. Das Ergebnis ist jenem aus Österreich (siehe Abbildung 4.3, Seite 79) sehr ähnlich.

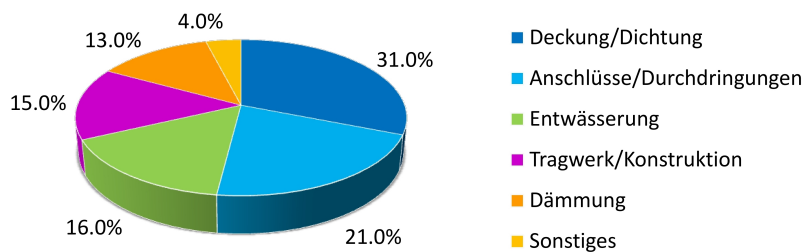


Abbildung 4.4: Unterteilung von Baumängeln/-schäden an der Bauteilgruppe Dächer nach [55]

4.1.1 Schadensbilder und deren mögliche Ursachen

Durch die Feuchtigkeitsbeanspruchung der Bauteile können unterschiedliche Schäden auftreten, diese reichen von optischen Schäden bis hin zu schweren Bauschäden. Dabei können auch schon kleinere Feuchtigkeitsschäden ein unbehagliches Wohnklima auslösen [50]. Feuchtigkeit im Bauwesen kann folgende Auswirkungen haben:

- Abplatzungen durch Frostschäden;
- Ausblühungen und Auslaugungen;
- Eisbildung und Tauwasserbildung an den Innenwänden;
- Feuchtigkeitsflecken/-streifen;
- Korrosion der Bewehrung;
- modriger, übler Geruch;
- Schimmelpilze;
- Verfärbungen und
- Verringerung des Wärmedurchlasswiderstandes.

Durch eingedrungene Feuchte können Frostschäden entstehen, die Betonabplatzungen sowie Risse im Beton zur Folge haben. [50]

Unter Ausblühungen wird das Auskristallisieren der Salze auf der Bauwerksoberfläche verstanden. Das in den Baustoff eingedrungene Wasser löst Salze und transportiert sie an die Oberfläche. Während das Wasser dort wieder verdunstet, bleiben die Salze zurück und bilden Flecken. [78]

Durch die Feuchtigkeit kann es auch zur Korrosion der Bewehrung kommen. Dies kann schwerwiegende Auswirkungen haben, denn die Bewehrungskorrosion kann zum Beispiel zu Betonabplatzungen oder zur Verringerung der Tragsicherheit führen. [16]

Oft bildet sich bei Eintritt von Feuchtigkeit in den Räumen der gesundheitsschädliche Schimmelpilz. Dieser ist nicht nur durch das optische Erscheinungsbild vorhanden, sondern führt auch zu einer Geruchsbelästigung. Beim Menschen kann er in manchen Fällen sogar allergische Reaktionen auslösen. [80]

Bauphysikalisch gesehen, wird durch die Feuchtigkeit auch der Wärmetransport im Baustoff beeinflusst. Durch die Feuchtigkeit nimmt nämlich die Wärmeleitfähigkeit zu, dadurch kann die Wärme nicht lange im Bauteil gespeichert werden, wie es sonst in einem trockenen Bauteil möglich gewesen wäre. [44]



Abbildung 4.5: Abspelungen eines Außenputzes [6]



Abbildung 4.6: Feuchteschäden an einer Decke [6]

Um diese Schäden zu verhindern bzw. zu vermeiden, muss schon in der Planung auf die richtige Detailausbildung geachtet werden. Ebenso können durch eine sachgemäße Ausführung beim Anbringen der Bauwerksabdichtungen sowie durch kontinuierliches Lüften Feuchtigkeitsschäden reduziert werden [79]. Kontrolle und Überwachung von Bauwerken erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass Feuchtigkeitsschäden frühzeitig erkannt werden. [18]

In der Tabelle 4.1 ab der Seite 82 sind typische Schadensbilder infolge von Feuchtigkeit aufgelistet sowie die möglichen Ursachen des Feuchtigkeitseintrittes. Die Beispiele wurden aus [17] übernommen. In der dritten Spalte befindet sich der Untersuchungsbereich (in der Tabelle mit „Ub“ abgekürzt). Hier werden die Schäden in zwei Gruppen („F“ und „P“) eingeteilt:

- **„F“**: steht für jene Schäden, bei denen die Feuchtigkeitsuntersuchung flächenhaft erfolgt.
- **„P“**: steht für jene Schäden, bei denen die Feuchtigkeitsuntersuchung punktuell erfolgt.

Eine flächenhafte Untersuchung ist zum Beispiel notwendig, wenn die Stelle des Schadens nicht der Stelle des Wassereintrittes entspricht. Bei Schäden wo dies auszuschließen ist, genügt eine punktuelle Feuchtigkeitsuntersuchung. Diese wird benötigt um das Ausmaß des Schadens feststellen zu können. Diese Unterteilung wird für die weitere Vorgangsweise zur Bestimmung der einsetzbaren Messgeräte zu einem bestimmten Schadensbild benötigt.

Die Schadensbilder in der folgenden Tabelle sind laut [17] nach den folgenden Bauteilkategorien eingeteilt:

- Fundamente und Bodenplatten;
- Außenwände zu Untergeschoßen;
- Außenwände zu Erd- und Obergeschoßen;
- Dächer;
- Decken, Treppen und Balkone.

Sie sind den Unterteilungen aus der Abbildung 4.1, Seite 78 ähnlich. Es können zu „erdberührten Bauteilen“ die Kategorien „Fundamente und Bodenplatten“ sowie „Außenwände zu Untergeschoßen“ sowie für „Dächer/Balkone“ die Kategorien „Dächer“ und „Decken, Treppen und Balkone“ gezählt werden.

Tabelle 4.1: Schäden und deren mögliche Ursachen

Schadensbilder	Mögliche Ursachen	Ub
Fundamente und Bodenplatten		
Wasserdurchtritt in der Bodenplatte	Keine Dimensionierung der Bodenplatte gegen Druckbeanspruchungen	F
Durchfeuchtungen der Kellerbodenplatte bzw. von Unterlagböden und Bodenbelägen	Beanspruchung durch stauendes Sickerwasser; Überschätzung der Dichtigkeit von Betonplatten	F
Durchfeuchtungen und Verfärbungen des unteren Wandbereiches	Undichtigkeit im Anschlußbereich Kellerboden/Kellerwand aufgrund von Betonierfugen oder mangelhaften Dichtungsmaßnahmen	P
Schimmelflecken auf Bodenbelag; modriger Geruch	Tauwasserbildung aufgrund fehlender, ungenügender oder durchfeuchteter Wärmedämmung	P
Außenwände zu Untergeschoßen		
Durchfeuchtungen und Putzschäden an der Außenwand im Erdgeschoss	Aufsteigende Feuchtigkeit aus der Kellerwand; fehlende horizontale Sperre gegen aufsteigende Feuchte	P
Durchfeuchtungen und Putzschäden an Kellerwänden; modriger Geruch, Pilzbefall	Ungenügende Durchlüftung; zu große Stauwasserbelastung; fehlende Dichtungsschichten	P
Durchfeuchtungsschäden der Kellerwand; Verfärbung, Pilzbildung, Ablösung von Innenputzen	Fehlende oder unzureichende Abdichtungen; stauendes Sickerwasser	P
Ausblühungen	Eindringung von Grund- und Sickerwasser; Tau- und Kondenswasserfeuchtigkeit	P
Eisbildung auf den Innenwänden	Kondensation; Wassereintrich	P
Wasserdurchtritte	Drückendes Sickerwasser; Risse; undichte Rohreinführungen	P

Schadensbilder	Mögliche Ursachen	Ub
Außenwände im Erd- und Obergeschoß		
Mauerwerksdurchfeuchtungen; Ausblühungen, Putzablösungen, Steinabsprengungen	Mangelhafter Feuchtigkeitsschutz im Sockelbereich; ungenügende Abdichtung bei An- und Abschlüssen; Eindringen von Schlagregen durch mangelhafte Fugenvermörtelung	P
Ausblühungen	Kristallisierende Salze an der Oberfläche aufgrund eingedrungener und anschließend verdunstender Feuchtigkeit; aufsteigende Feuchtigkeit; Wassereinbruch	P
Feuchtigkeitsflecken	Wassereinsickerung, Wasserundichtheit; aufsteigende Feuchtigkeit	P
Tauwasserbildung an der Innenwand	Hohe Raumfeuchtigkeit; geringe saugfähige Wandoberfläche	P
Dächer		
Feuchtigkeitschäden in den Räumen; Schimmelpilz	Thermisch schlecht ausgebildeter Übergang von Außenwand zu Flachdach; undichte Randabschlüsse; beschädigte Dachhaut	F
Wasserlachen nach Regenfällen	Unebene und ungenügende Abflussneigung; verstopfte Abläufe	F
Deckendurchbiegungen	Stehendes Wasser durch schlechten Abfluss	F
Decken, Treppen und Balkone		
Durchfeuchtung und Schäden an der Balkonplatte	Ungenügende oder mangelhafte Dichtung der Balkonböden; mangelhafte Balkonentwässerung	P
Feuchtigkeitsflecken, Schimmelpilz und Verfärbungen an der Deckenunterseite sowie an den Aussenecken von Räumen	Vorhandene Wärmebrücken bei Konstruktionsübergängen	P

4.1.2 Ablaufschema zur Auswahl der Messgeräte

Anhand der Tabellen 4.2 und 4.3 auf der Seite 85 sollen zu einem bestimmten Schadensbild die möglichen einsetzbaren Messgeräte herausgefiltert werden können. Dabei muss der Anwender zuerst zwischen Messgeräten zur Überwachung oder zur Begutachtung von Feuchtigkeitseintritten auswählen. Messgeräte zur Überwachung werden gewählt um den Feuchtigkeitseintritt frühzeitig erkennen zu können und so größere Schäden zu verhindern. Messgeräte zur Begutachtung werden hingegen gewählt, wenn das Schadensbild bereits vorhanden ist. Weiters sollte der Anwender den Aufbau der Konstruktion kennen um entscheiden zu können, ob eine Baumaßnahme erforderlich ist oder nicht. Denn die meisten Messgeräte benötigen einen direkten Kontakt zum mineralischen Baustoff um die vorhandene Feuchtigkeit messen zu können. Deshalb gibt es in den Tabellen 4.2 und 4.3 noch zwei weitere Auswahlmöglichkeiten:

- „Ja“: bedeutet, dass bauliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsmessung notwendig sind.
- „Nein“: bedeutet, dass keine baulichen Maßnahmen notwendig sind.

Mit den Informationen aus der vorherigen Tabelle (Tabelle 4.1, ab der Seite 82) und den oben genannten Unterteilungen können dann die einsetzbaren Messgeräte bestimmt werden (siehe Tabelle 4.2, Seite 85 und Tabelle 4.3, Seite 85). In der folgenden Abbildung (Abbildung 4.7, Seite 84) ist der Ablauf zur Bestimmung der Messgeräte zu einem bestimmten Schadensbild grafisch dargestellt.

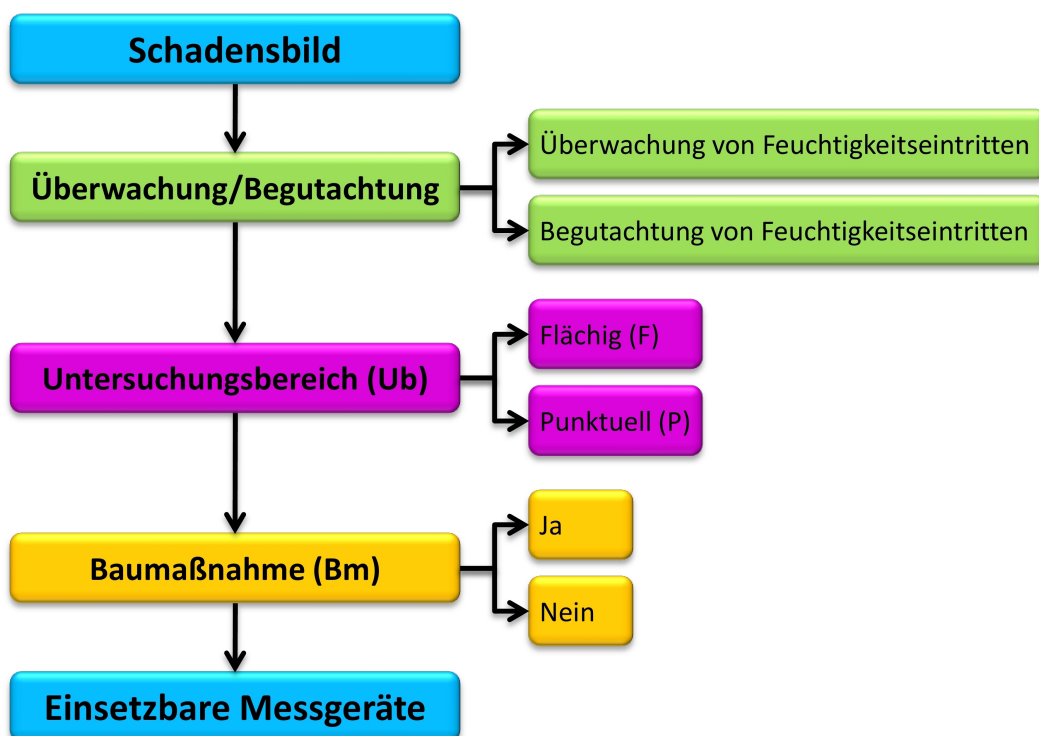


Abbildung 4.7: Ablauf zur Bestimmung der einsetzbaren Messgeräte

Tabelle 4.2: Messgeräte/-verfahren zur **Überwachung** von Feuchtigkeitseintritten

Messgeräte/-verfahren	Ub:	Flächig (F)		Punktuell (P)	
	Bm:	Ja	Nein	Ja	Nein
Faseroptischer Sensor			x		
MEMS			x		
Mikrowellenmessverfahren		x		x	
Multiring-Elektrode		x		x	
Time-Domain Reflektometrie		x		x	

Tabelle 4.3: Messgeräte/-verfahren zur **Begutachtung** von Feuchtigkeitseintritten

Messgeräte/-verfahren	Ub:	Flächig (F)		Punktuell (P)	
	Bm:	Ja	Nein	Ja	Nein
Calciumcarbid-Verfahren				x	
Trockenschrankverfahren				x	
Gamma-Strahlungs-Verfahren		x		x	
Impuls-Radar-Verfahren		x		x	
Infrarotemissions-Verfahren		x			
Infrarotreflexions-Verfahren		x			
Kapazitives Verfahren					x
Kernspinresonanz Verfahren					x
Leitfähigkeitsmessverfahren		x		x	
Mikrowellenmessverfahren		x		x	
Multiring-Elektrode		x		x	
Neutronenstrahlungs-Verfahren			x		x
Time-Domain Reflektometrie		x		x	
Wärmeleitfähigkeitsverfahren				x	

4.2 Schadensursachen

Um in Zukunft Schäden vermeiden zu können, ist es wichtig zu wissen, wie diese überhaupt entstehen konnten. Denn erst durch die Kenntnis der Schadensursache ist es möglich, den Fehlerbereich erkennen zu können und auszubessern.

Im 1. Österreichischen Bauschadensbericht wurde diesbezüglich auch eine Umfrage erstellt [3]. Die Schadensursachen wurden laut [3] in fünf Kategorien unterteilt:

- Ausführungsfehler;
- Materialfehler;
- Nicht eindeutig feststellbar;

- Nutzung und
- Planungsfehler.

Das Ergebnis zeigt (siehe Abbildung 4.8, Seite 86), dass die meisten Schäden sind auf Ausführungsfehler und Planungsfehler zurückzuführen. [3]

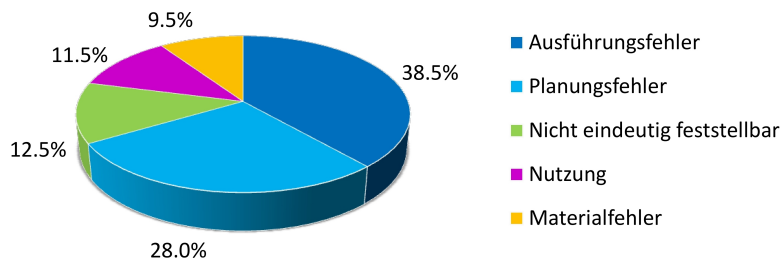


Abbildung 4.8: Schadensursachen von Baumängeln/-schäden nach [3]

Im 2. und 3. Österreichischen Bauschadensbericht wurde zudem eine detailliertere Erhebung der Schadensursachen erstellt. Dabei wurden Arbeiter am Bau und Fachleute (z.B.: Baumeister, Planer, Sachverständige) befragt. [1] [2] Diese konnten folgende Punkte als Problembereich/Verbesserungsmöglichkeit auswählen:

- Ausbildung;
- Bauleitung/-kontrolle;
- Bauzeit/Zeitdruck;
- Koordination mit anderen Gewerken;
- Material, Produkte;
- Planung (Details) und
- Untergrund/Anschlüsse.

In Abbildung 4.9, Seite 87 ist das Ergebnis zusammengefasst, das sich auf die Ausführung von Abdichtungsarbeiten von erdberührten Bauteilen bezieht. Es ist zu erkennen, dass sowohl Arbeiter, als auch Fachleute im Bereich „Material, Produkte“ das geringste und im Bereich „Planung“ das größte Verbesserungsvermögen sehen. Der geringe Prozentsatz von „Material, Produkte“ zeigt, dass die eingesetzten Abdichtungsmaterialien den heutigen Anforderungen am Bau entsprechen. Eine Verbesserungsmöglichkeit in der Planung wäre zum Beispiel eine bessere Kenntnis der spezifischen Normen für Abdichtungsarbeiten. [1]

Auch der Bereich „Bauzeit/Zeitdruck“ wurde von beiden Gruppen gleich stark beurteilt und ist an der dritten Stelle gereiht. Doch dieser Punkt wird sich in der Praxis nur schwer verbessern lassen, da der Kosten- und Termindruck auf den Baustellen nicht viel Zeit für die Ausführung von Abdichtungsarbeiten übrig lassen. Die größte Abweichung ist im Bereich „Ausbildung“ zu finden. Während die Fachleute der Ausbildung wenig Beachtung schenken, sind die Arbeiter der Meinung, dass hier ein großes Verbesserungspotenzial besteht. Grund ist die Tatsache, dass es keine spezielle Ausbildung für Abdichtungsarbeiten bei erdberührten Bauteilen gibt und die Arbeiten am Bau meistens nur angelernt werden. [1]

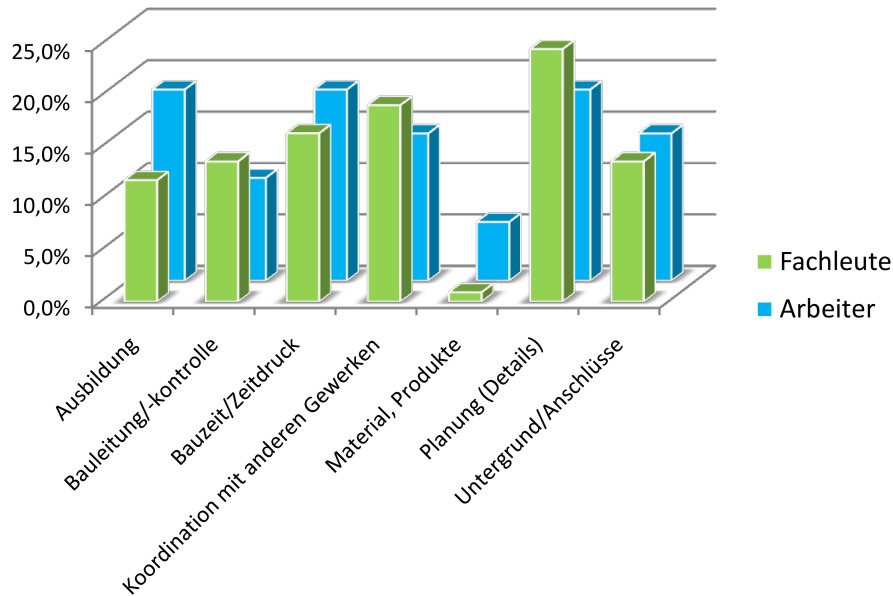


Abbildung 4.9: Problembereiche/Verbesserungsmöglichkeiten bei Abdichtungsarbeiten erdbehrter Bauteile nach [1]

Die Abbildung 4.10, Seite 87 bezieht sich auf die Befragung der Problembereiche/Verbesserungsmöglichkeiten bei der Ausführung von Abdichtungsarbeiten von Flachdächern, Balkonen und Terrassen. Das Ergebnis ist dem vorherigen sehr ähnlich. So ist der Bereich „Material, Produkte“ hier ebenfalls an der letzten Stelle und die Bereiche „Planung“ und „Bauzeit/Zeitdruck“ sehen die Arbeiter und Fachleute als die größten Problembereiche an. [2]

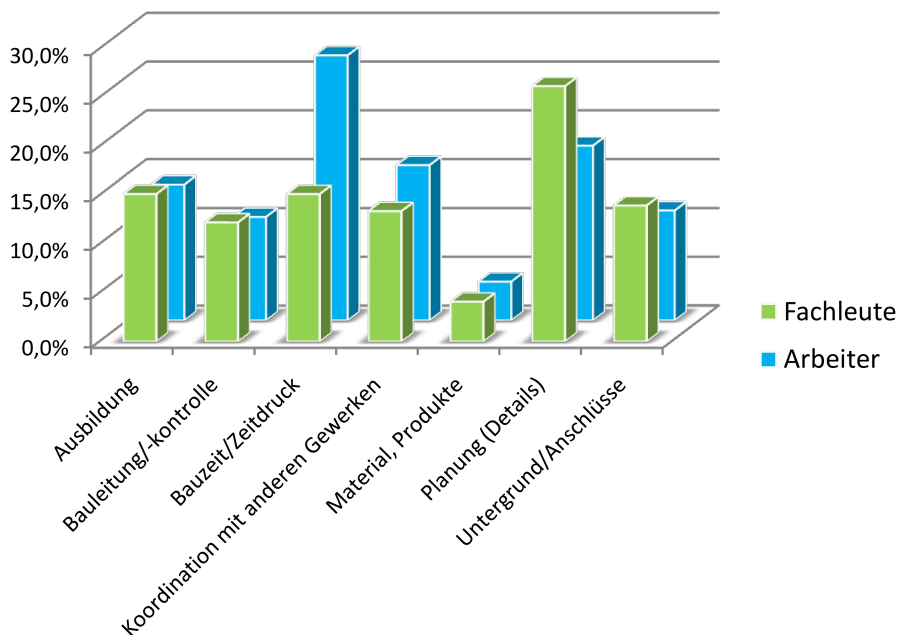


Abbildung 4.10: Problembereiche/Verbesserungsmöglichkeiten bei Abdichtungsarbeiten von Flachdächern, Balkonen und Terrassen nach [2]

Es gibt aber einen großen Unterschied zu den Abdichtungsarbeiten von erdberührten Bauteilen. Der Bereich „Ausbildung“ wird von den Fachleuten höher eingestuft als von den Arbeitern. Zurückführen lässt sich dies auf die hohe Teilnahme der Arbeiter an beruflichen Weiterbildungsmaßnahmen. [2]

4.3 Zeitpunkt der Schadenseintritte

Laut [3] wird in drei Perioden (siehe auch Abbildung 4.11, Seite 88) unterschieden, in denen Schäden unterschiedlich häufig auftreten:

- **Frühausfallperiode:** Hier kommt es zu einer hohen Versagensrate, die auf Konstruktions- und Materialfehler zurückzuführen sind.
- **Brauchbarkeits-/Nutzungsperiode:** In dieser Phase ist die konstante Versagensrate niedrig.
- **Verschleißausfallperiode:** Hier nimmt die Versagensrate aufgrund von Ermüdungs-, Alterungs- und Verschleißerscheinungen sowie mangelnder Instandhaltung wieder zu.

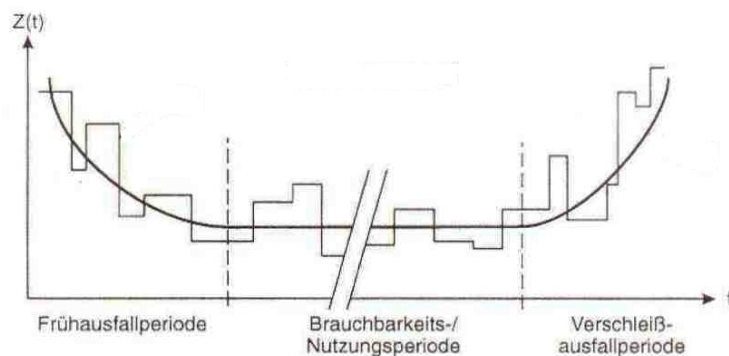


Abbildung 4.11: Einteilung der Perioden [3]

Für die Abbildung 4.12, Seite 88 wurden die Daten eines Versicherungsmaklers herangezogen, somit wurden nur die Schadensfälle mit einer Planungshaftpflichtversicherung berücksichtigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im ersten Jahr nach der Fertigstellung des Baus die meisten Schäden auftreten. [3]

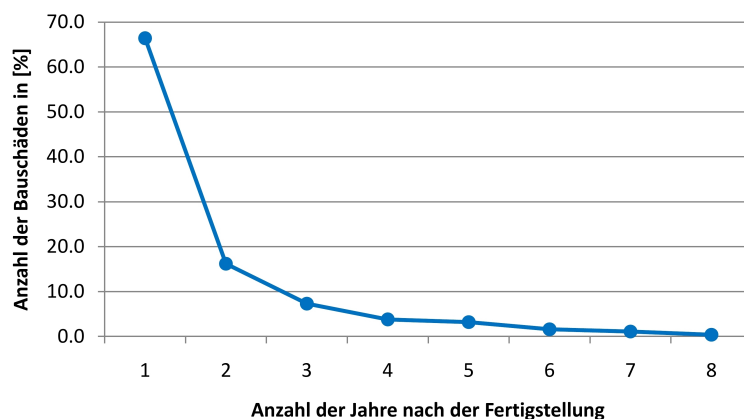


Abbildung 4.12: Zeitpunkt des Schadenseintrittes nach [55]

Nach den oben beschriebenen Perioden kommt es zwangsläufig zu einem Anstieg der Bauschäden mit zunehmendem Gebäudealter aufgrund von Instandsetzungs- und Modernisierungsbedarf. Dies ist in der Abbildung 4.13, Seite 89 ersichtlich. In den Jahren zwischen 1971 und 1990 ist aber der Anteil der Bauschäden größer als in den Jahren davor. Zurückführen lässt sich dies auf die Herstellung von Flachdachbauten Anfang der Siebziger Jahre, welche schon Mitte der Neunziger Jahre wieder saniert werden mussten. Die Sanierung erfolgte aber teilweise nur mangelhaft, sodass neuerliche Instandsetzungen notwendig waren. [55]

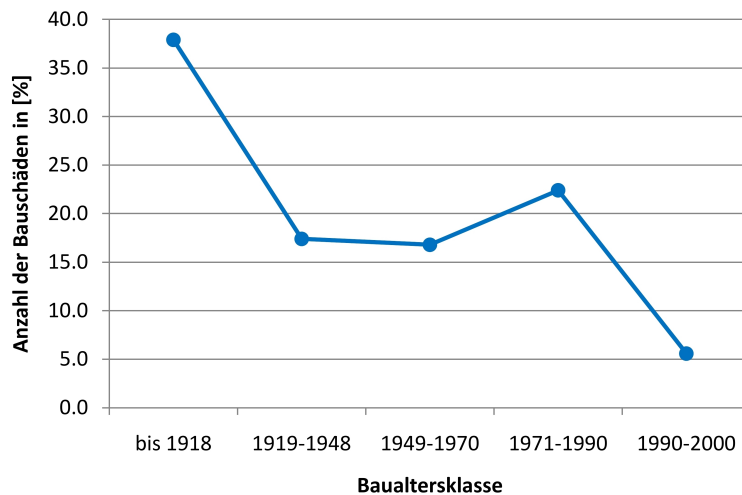


Abbildung 4.13: Schadenshäufigkeit nach Baualtersklasse nach [46]

4.4 Kosten im Bauwesen

Um eine Vorstellung zu bekommen, um welche Geldsummen es sich im Bauwesen handelt, ist in der Abbildung 4.14, Seite 89 der Anteil des Wirtschaftszweiges „Bauwesen“ am Bruttoinlandsprodukt von Österreich ersichtlich. 2003 betrug das Bruttoinlandsprodukt von Österreich 223.302 Millionen Euro und im Jahr 2008 erreichte es 281.868 Millionen Euro. [77]

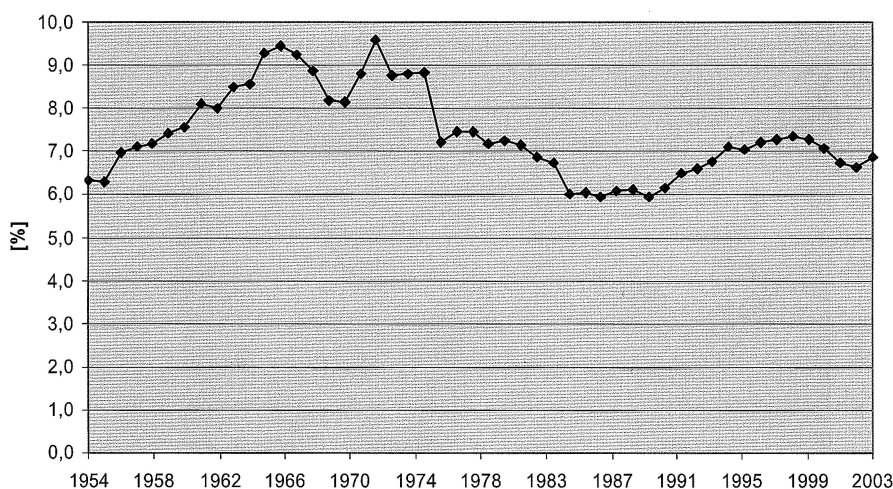


Abbildung 4.14: Anteil des Bauwesens am Bruttoinlandsprodukt in Österreich [3]

In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass in den Sechziger Jahren und Anfang der Siebziger viel Geld in die Bauindustrie investiert wurde. Grund dafür war der starke Ausbau der Infrastruktur und die Errichtung vieler neuer Wohnbauten. Danach sank der Anteil des Bauwesens am Bruttoinlandsprodukt und erst 1989 kam es wieder zu einer Steigerung. Ursache hierfür war die Öffnung des Ostens, denn dadurch gab es wieder eine verstärkte Nachfrage an Wohnraum. [3]

Die Kosten für die Behebung der Mängel und Schäden sind natürlich nur ein Bruchteil der Gesamtkosten im Bauwesen. Sie sind aber nicht zu vernachlässigen, weil diese Kosten vermieden werden könnten. Im Zuge der Erstellung des 1. Österreichischen Bauschadensberichtes wurden Bauunternehmen befragt, wie viel Prozent die Kosten für Mängel-/Schadensbehebung bezogen auf die Baukosten ausmachen würden [3].

Aus den Abbildungen 4.15 und 4.16, Seite 90 ist zu erkennen, dass bei den meisten Unternehmen die Kosten für die Behebung der Mängel und Schäden mehr als ein Prozent der Baukosten beträgt. Würden diese Fehler reduziert bzw. vermieden werden, könnte viel Geld gespart werden.

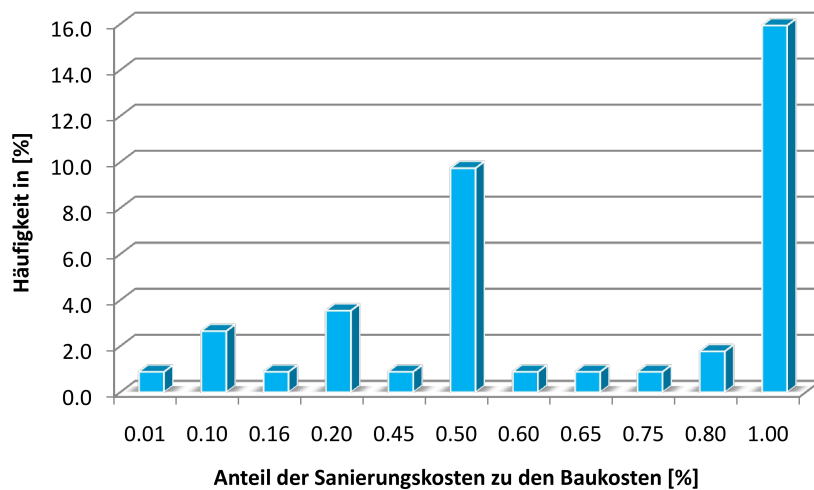


Abbildung 4.15: Anteil der Kosten für Mängel-/Schadensbehebung $\leq 1\%$ nach [3]

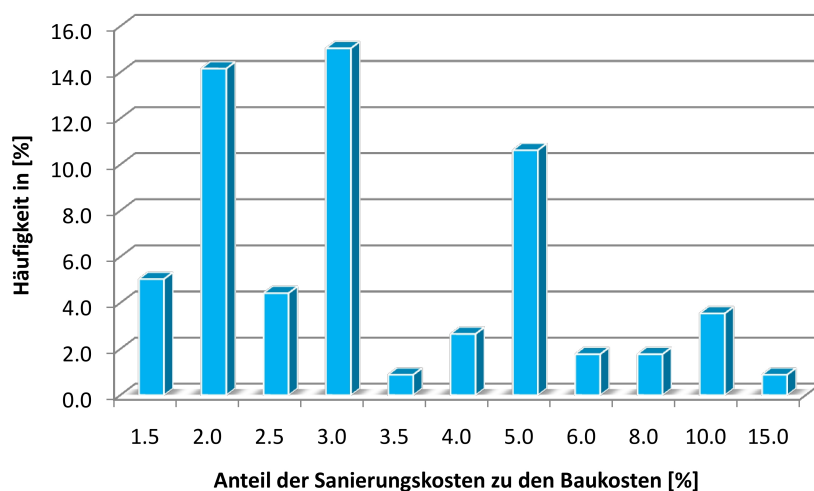


Abbildung 4.16: Anteil der Kosten für Mängel-/Schadensbehebung $> 1\%$ nach [3]

Unter den Baukosten sind laut [3] folgende Kosten zu verstehen:

- Kosten für die Aufschließung,
- Bauwerkskosten (Rohbau, Ausbau und Technik),
- Einrichtungskosten und
- Kosten für Außenanlagen.

4.5 Zusammenfassung

Am Anfang dieses Kapitels wurde anhand von Schadensbildern gezeigt, mit welchen Messgeräten und -verfahren es eventuell möglich wäre, diese zu vermeiden. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein System zur Feuchtigkeitsüberwachung sicher eine gute Investition wäre, da die meisten Schäden bei Wasser beanspruchten Bauteilen auftreten. Bei Neubauten lässt sich während des Baus leicht ein Messsystem installieren, wodurch eine kontinuierliche Überwachung erfolgen könnte. Dabei könnten Schäden frühzeitig erkannt und ausgebessert werden, und so teure Folgeschäden vermieden/verhindert werden.

Ebenso wird in diesem Kapitel auf die Schadensursachen hingewiesen. Dabei wurde auch eine Befragung von Arbeitern und Fachleuten aus dem Österreichischen Bauschadensbericht herangezogen, um zu verdeutlichen, welche Ansichten in der Praxis über die Auslöser von Schäden bestehen. Durch die Kenntnis der Ursachen können in Zukunft Fehler vermieden werden.

Die Ergebnisse aus dem Abschnitt 4.3 ab der Seite 88 weisen daraufhin, dass bei älteren Gebäuden und vor allem auch bei Flachdächern ein hoher Anteil von Bauschäden zu beobachten sind. Außerdem bietet dieses Kapitel noch einen Einblick auf die Kosten im Bauwesen. Daraus ist ersichtlich, dass es sich lohnen würde, gleich am Anfang eines Bauprojektes in ein Überwachungssystem zu investieren, um spätere kostenaufwendige Sanierungsmaßnahmen bedingt durch die erschwerte Schadensortung zu vermeiden.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die Möglichkeiten und Grenzen der marktrelevanten Systeme zur Feuchtemessung darzustellen. Dabei wurden die einzelnen Messgeräte näher beschrieben und in einer Checkliste zusammengefasst. Diese soll der TU Graz und der Firma Arcon Bauwerksicherheit GmbH helfen eine Übersicht zu erhalten.

Zu Beginn der Arbeit wurden die Grundlagen zum Thema Feuchtigkeit in porösen, mineralischen Baustoffen näher erläutert. Hierzu gehören die Kenntnisse über die Eigenschaften der Poren und von Wasser sowie die Kenntnisse über die Transportvorgänge in porösen Baustoffen und über feuchtigkeitsbezogene Baustoffkennwerte. Die Beschreibung dieser Grundlagen soll dazu dienen, dass die Leser dieser Arbeit auf den gleichen Wissensstand gebracht werden.

Anschließend wurden die Messmethoden zur Feuchtigkeitsbestimmung beschrieben. Dabei wurde in direkte und indirekte Methoden unterschieden. Durch die Kenntnis über den Messvorgang der einzelnen Methoden konnte eine weitere Unterteilung getroffen werden. In der Tabelle 2.2, Seite 47 wurden die Messverfahren in jene zur Bestimmung des Feuchtegehaltes sowie der Feuchtigkeitsverteilung untergliedert.

Im nächsten Schritt wurden die marktrelevanten Messgeräte aufgelistet. Für eine standardisierte Beschreibung der am Markt erhältlichen Geräte wurde eine Tabelle (siehe Seite 50) mit einheitlichen Kriterien erstellt. Anhand dieser Kriterien, wie zum Beispiel der Kosten oder der Messtiefe ist ein einfacher Vergleich zwischen den einzelnen Messverfahren möglich. Dadurch konnte dann eine zweiteilige Checkliste (siehe Tabelle 3.2 und 3.3, Seite 73 und 74) erstellt werden. Diese soll den Benutzern bei der Suche nach einem geeigneten Gerät für eine bestimmte Problemstellung als Hilfe dienen.

Abschließend wurde noch auf Schadenshäufigkeit und -ausmaß durch Feuchteeinwirkung auf Bauteile bezogen auf Österreich eingegangen. Anhand von Statistiken wurde gezeigt, dass die von Wasser verursachten Schäden einen hohen Prozentsatz ausmachen. In der Tabelle 4.1, Seite 82 wurden Schadensbilder mit den möglichen Ursachen aufgelistet. Außerdem wurde in der Tabelle noch angemerkt, ob die Feuchtigkeitsuntersuchung bei dem jeweiligen Schadensbild flächenhaft oder punktuell erfolgen soll. Diese Information war für die weitere Vorgangsweise notwendig, um Kriterien für die Auswahl von geeigneten Messgeräten zu einem bestimmten Schadensbild zu erhalten. Die Abbildung 4.7, Seite 84 zeigt das Ablaufschema zur Auswahl der geeigneten Messgeräte. Dabei gibt es drei Schritte:

1. Es muss unterschieden werden, ob das Messgerät zur Überwachung (siehe Tabelle 4.2, Seite 85) benutzt wird, um Feuchtigkeitseintritte frühzeitig erkennen zu können oder ob das Messgerät verwendet wird, um bei einem bereits eingetretenen Schaden das Schadensausmaß feststellen zu können (siehe Tabelle 4.3, Seite 85).
2. Je nach Schadensbild wird die zuvor erwähnte punktuelle oder flächenhafte Feuchtigkeitsuntersuchung gewählt.
3. Es ist noch zu unterscheiden, ob eine Baumaßnahme notwendig ist, damit ein direkter Kontakt zwischen Messgerät und mineralischem Baustoff besteht.

Anhand dieser drei Überlegungen liefern die Tabellen 4.2 und 4.3, Seite 85 die geeigneten Messgeräte. Durch den Vergleich dieser Geräte in der Checkliste (Tabelle 3.2 und 3.3, Seite 73 und 74), kann das Ergebnis weiter verfeinert werden.

Des Weiteren wurde in dieser Arbeit noch auf die Schadensursachen und auf die Kosten für Mängel- und Schadensbehebung eingegangen. Durch die Kenntnis der Ursachen sollen in Zukunft Schäden vermieden und der Sanierungsaufwand reduziert werden.

Ausblick

Durch die gewonnenen Kenntnisse aus dem Kapitel 4 konnten die möglichen Anwendungsbereiche für das neue System zur Überwachung der Feuchtigkeit herausgefiltert werden (siehe Tabelle 5.1, Seite 95). Dabei wurden die Bauteilkategorien von der Tabelle 4.1, Seite 82 übernommen:

- Fundamente und Bodenplatten;
- Außenwände zu Untergeschoßen;
- Außenwände zu Erd- und Obergeschoßen;
- Dächer;
- Decken, Treppen und Balkone.

Für die Bauteilkategorie gibt es zwei Möglichkeiten, entweder sie ist besonders geeignet oder sie ist nur bedingt geeignet:

- **„besonders geeignet“:** bei diesen Bauteilgruppen würde es sich in den meisten Fällen auszahlen ein Überwachungssystem einzubauen.
- **„bedingt geeignet“:** bei diesen Bauteilgruppen ist eine Feuchtigkeitsüberwachung nur in Ausnahmefällen notwendig, zum Beispiel bei Gebäuden, in denen wertvolle Gegenstände aufbewahrt werden.

Bei horizontalen von Wasser beanspruchten Bauteilen kann ein Überwachungssystem von Vorteil sein, da die Leckstelle nicht der Wasseraustrittsstelle entspricht. Bei den vertikalen Bauteilen kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Ort des Wassereintrittes sich

Tabelle 5.1: Mögliche Anwendungsbereiche des neuen Überwachungssystems

Bauteilgruppe	besonders geeignet	bedingt geeignet
Fundamente und Bodenplatten	x	
Außenwände zu Untergeschoßen		x
Außenwände zu Erd- und Obergeschoßen		x
Dächer	x	
Decken, Treppen und Balkone		x

mit dem des Wasseraustrittes gleicht. Daher ist hier ein Überwachungssystem nur in speziellen Fällen von Bedeutung. Deswegen wurde in der Tabelle 5.1, Seite 95 diese Zuordnung getroffen.

Durch Überwachungssysteme könnten größere Folgeschäden vermieden werden, da das eingedrungene Wasser frühzeitig erkannt werden könnte und rechtzeitig Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden könnten. Durch die frühzeitige Erkennung des Schadeneintrittes würde sich der Sanierungsaufwand wesentlich reduzieren. Ein Überwachungssystem würde sich somit rentieren, wenn die Kosten des Überwachungssystems geringer sind als die Kosten an Instandhaltung und -setzung bei einem Sanierungsaufwand ohne frühzeitiger Schadenserkenkung.

Bei der Erstellung dieser Masterarbeit wurde deutlich, dass es zum Thema Feuchtigkeitsuntersuchung noch einige Informations- und Wissenslücken gibt. Dies hat mehrere Gründe:

- Es fehlen Richtlinien und Normen zum Thema Feuchtigkeitsmessung.
- Bei neueren Überwachungssystemen (z.B. bei dem faseroptischen Feuchtesensor) fehlen Angaben über deren Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit.
- Das Messsystem kommt in der Praxis nicht zur Anwendung, weil es zu kompliziert oder zu zeitaufwendig ist.
- Die Anschaffung oder die laufenden Kosten des Messgerätes sind zu kostenintensiv.
- Es gibt zu wenige Erfahrungswerte.

Das neue System zur Überwachung der Feuchtigkeit sollte vor allem folgende Anforderungen erfüllen:

- Kostengünstig und wirtschaftlich;
- zuverlässig;
- einfach in der Anwendung (praxistauglich);
- keine zusätzlichen Baumaßnahmen für den Einbau und bei der Nutzung erfordern;
- laufende Nutzung ohne großen Aufwand ermöglichen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beanspruchungen durch Wasser auf Bauwerke [13]	22
2.2	Schüttdichte (I), Rohdichte (II) und Reindichte (III) [49]	23
2.3	Geschlossene Poren (1); offene, durchströmbare Poren (2a) und offene, nicht durchströmbare Poren (2b) [54]	24
2.4	Flaschenhalsporen (1) und Sackporen (2) [52]	24
2.5	Porenverteilung von Beton, Ziegel und Sandstein [49]	25
2.6	Übersicht über Transportmechanismen	26
2.7	Übersicht über die Wechselwirkung zwischen Bauprodukt und Wasser nach [47] verändert	27
2.8	Sorptionsisotherme für verschiedene Baustoffe [29]	28
2.9	Wasserdampfdiffusion und Effusion [13]	29
2.10	Wassermolekül [59]	30
2.11	Wasserstoffbrückenbindung [60]	30
2.12	Konkave und konvexe Fläche [4]	31
2.13	Hydrophiles und hydrophobes Verhalten [5]	31
2.14	Klassifizierung der Materialfeuchtemessverfahren nach [23] verändert	37
2.15	Materialien für das Calciumcarbid-Verfahren [29]	39
2.16	Prinzip der Widerstandsmessung [12]	40
2.17	Prinzip der kapazitiven Messung [12]	42
2.18	Kondensator mit Dielektrikum [11]	42
2.19	Prinzip des Neutronenstrahlungs-Verfahrens [25]	44
2.20	Thermogramm eines Gebäudes [63]	46
3.1	Auswahlkriterien für die Checkliste	69
4.1	Schadensbetroffene Bauteile nach [3]	78

4.2	Unterteilung von Baumängeln/-schäden an der Bauteilgruppe Innenwände nach [55]	78
4.3	Mängel/Schäden an Abdichtungen von Flachdächern, Balkonen und Terrassen nach [2] verändert	79
4.4	Unterteilung von Baumängeln/-schäden an der Bauteilgruppe Dächer nach [55]	79
4.5	Absprengungen eines Außenputzes [6]	80
4.6	Feuchteschäden an einer Decke [6]	80
4.7	Ablauf zur Bestimmung der einsetzbaren Messgeräte	84
4.8	Schadensursachen von Baumängeln/-schäden nach [3]	86
4.9	Problembereiche/Verbesserungsmöglichkeiten bei Abdichtungsarbeiten erdbe-rührter Bauteile nach [1]	87
4.10	Problembereiche/Verbesserungsmöglichkeiten bei Abdichtungsarbeiten von Flachdächern, Balkonen und Terrassen nach [2]	87
4.11	Einteilung der Perioden [3]	88
4.12	Zeitpunkt des Schadenseintrittes nach [55]	88
4.13	Schadenshäufigkeit nach Baualtersklasse nach [46]	89
4.14	Anteil des Bauwesens am Bruttoinlandsprodukt in Österreich [3]	89
4.15	Anteil der Kosten für Mängel-/Schadensbehebung ≤ 1 % nach [3]	90
4.16	Anteil der Kosten für Mängel-/Schadensbehebung > 1 % nach [3]	90

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung der Poren nach [4] und [14] verändert	25
2.2	Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes und der Feuchtigkeitsverteilung	47
3.1	Überblick über Messverfahren	51
3.2	Checkliste für die Auswahl des Messverfahrens 1/2	73
3.3	Checkliste für die Auswahl des Messverfahrens 2/2	74
4.1	Schäden und deren mögliche Ursachen	82
4.2	Messgeräte/-verfahren zur Überwachung von Feuchtigkeitseintritten	85
4.3	Messgeräte/-verfahren zur Begutachtung von Feuchtigkeitseintritten	85
5.1	Mögliche Anwendungsbereiche des neuen Überwachungssystems	95

Literaturverzeichnis

- [1] BALAK M., HUBNER W., ROSENBERGER R., STEINBRECHER M.: *2. Österreichischer Bauschadensbericht - Abdichtungen im Hochbau, erdberührte Bauteile*. Wirtschaftskammer Österreich, Wien, 2008
- [2] BALAK M., HUBNER W., ROSENBERGER R., STEINBRECHER M.: *3. Österreichischer Bauschadensbericht - Abdichtungen im Hochbau, Flachdächer, Balkone und Terrassen*. Wirtschaftskammer Österreich, Wien, 2009
- [3] BALAK M., ROSENBERGER R., STEINBRECHER M.: *1. Österreichischer Bauschadensbericht*. Wirtschaftskammer Österreich, Wien, 2005
- [4] BEDDOE R. E.: *Dauerhaftigkeit von Baustoffen - Transportvorgänge; Skriptum*. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, 2006
- [5] BENEDIX R.: *Chemie für Bauingenieure*. B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig, 1999
- [6] BLAICH J.: *Bauschäden - Analyse und Vermeidung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1999
- [7] BLUMENTRITT M.: *Faseroptische Sensoren zur Überwachung chemischer Korrosionsprozesse in Stahlbetonbauwerken*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 2007
- [8] DAUBERSCHMIDT C.: *Multiring-Elektroden - Funktionsweise, Messtechnik und praktische Anwendung*. Institut für Bauforschung Aachen; in: Vortrag zum 29. Aachener Baustofftag am 18.11.2003
- [9] DGZFP-MERKBLATT: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung - Merkblatt für thermografische Untersuchungen an Bauteilen und Bauwerken*, 1993
- [10] DÄUBER F.: *Aktueller Stand der Bauwerksdiagnostik in der Gebäudesanierung - Zerstörende Verfahren zur Laborprüfung mineralischer Baustoffe*. Technische Universität Graz, 2007
- [11] EICHLER J.: *Physik - Grundlagen für das Ingenieurstudium - Kurz und prägnant*. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007
- [12] FISCHBACH M.: *Messtechnik - Leckortung - Trocknungsverfahren - Baubeschleunigung*. MBS Trocknungs-Service, Inning
http://www.immobilienvorwalter-nrw.de/Portals/0/pdf/Referat_Vortrag_Markus_Fischbach.pdf, [Stand 04.02.2010]

- [13] FISCHER H.-M., JENISCH R., STOHRER M., HOMANN M., FREYMUTH H., RICHTER E., HÄUPL P: *Lehrbuch der Bauphysik; Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008
- [14] GERDES A.: *Dauerhaftigkeit des Werkstoff Betons - ausgewählte Werkstoffeigenschaften*. Forschungszentrum Karlsruhe; in: Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, 1. Jahrgang, Heft 2, 45-68, 2002
http://www.fzk.de/fzk/groups/itc-wgt/documents/internetdokument/id_036554.pdf, [Stand 15.01.2010]
- [15] HUBER G., RICCABONA C: *Baustoffkunde*. Manz Verlag Schulbuch GmbH, Wien, 1997
- [16] HUNKELER F., MÜHLAN B., UNGRICHT H.: *Risiko von Betonabplatzungen infolge Bewehrungskorrosion*. Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg, 2004
<http://www.tfb.ch/htdocs/Files/VSS/VSS%20603.pdf>, [Stand 01.02.2010]
- [17] IP BAU: *Feindiagnose im Hochbau*. Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993
<http://www.bbase.ch/pdf/tipps/432%20Feindiagnose.pdf>, [Stand 14.01.2010]
- [18] IP BAU: *Gebäudeunterhalt - Handbuch für die Zustandsbeurteilung*. Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993
<http://www.pmsag.ch/pdf/tipps/427%20Gebaueudeunterhalt.pdf>, [Stand 14.01.2010]
- [19] KIESSL K., KRUS M: *Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz*. Frauenhofer IRB-Verlag; in: IBP Mitteilung 148, 1987
<http://www.ibp.fhg.de/literatur/ibpmitt/index.html>, [Stand 30.10.2009]
- [20] KÖNEKE M.: *Schimmel im Haus; Erkennen - Vermeiden - Bekämpfen*. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002
- [21] KRÜGER M., GROSSE C.: *Preiswerte Dauerüberwachung von Bauwerken mit drahtloser Sensorik*. In: Fachtagung Bauwerksdiagnose, 22.-24. Februar 2006 in Berlin, Vortrag 16
<http://www.ndt.net/article/v11n01/v16krueger/v16krueger.pdf>, [Stand 10.11.2009]
- [22] KRUS M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe - Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken*. Universität Stuttgart, 1995
- [23] KUPFER K.: *Materialfeuchtemessung; Grundlagen - Meßverfahren - Applikationen - Normen*. Expert Verlag, Renningen - Malsmheim, 1997
- [24] LEIMER H.-P.: *Feuchte und Feuchtetransport; Vorlesungsskripte zur Bauphysik WS 2004/05*. Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim
- [25] LESCHNIK W.: *Bericht: Feuchtemessung an Baustoffen - Zwischen Klassik und Moderne*. Technische Universität Hamburg - Harburg; in: Feuchtetag '99, 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin
http://www.dgzfp.de/pages/tagungen/berichtsbaende/bb_69-CD/bb69-h2.pdf, [Stand 29.10.2009]

- [26] LIERSCH K. W., LANGNER N.: *Bauphysik kompakt; Wärme - Feuchte - Schall*. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [27] LYKOW A. W.: *Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern*. Akademie-Verlag GmbH, Berlin, 1958
- [28] MAYDL P., TRITTHART J.: *Baustofflehre GL; WS 2007/08; Vorlesungsskriptum WS 2007/08*. Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung, Technische Universität Graz
- [29] MOMBER A. W., SCHULZ R.-R.: *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton; Bearbeitung - Eigenschaften - Prüfung*. Birkhäuser Basel, 2006
- [30] MOSCHIG G. F.: *Bausanierung; Grundlagen - Planung - Durchführung*. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008
- [31] ÖNORM B 3303: *Betonprüfung*. Ausgabe 2002-09-01
- [32] ÖNORM B 3355-1: *Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk; Teil 1: Bauwerksdiagnose und Planungsgrundlagen*. Ausgabe 2006-03-01
- [33] ÖNORM B 3355-2: *Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk; Teil 2: Verfahren gegen aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk*. Ausgabe 2006-03-01
- [34] ÖNORM EN 12390-8: *Prüfung von Festbeton; Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck*. Ausgabe 2009-05-01
- [35] ÖNORM EN 13057: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren; Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme*. Ausgabe 2002-09-01
- [36] ÖNORM EN 13187: *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Qualitativer Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen, Infrarotverfahren*. Ausgabe 1999-03-01
- [37] ÖNORM EN 1925: *Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung*. Ausgabe 1999-06-01
- [38] ÖNORM EN 772-11: *Prüfverfahren für Mauersteine; Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbeton, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln*. Ausgabe 2004-06-01
- [39] ÖNORM EN ISO 12570: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur*. Ausgabe 2000-07-01
- [40] POSCH G.: *Aktueller Stand der Bauwerksdiagnostik in der Gebäudeerhaltung - Zerstörungsfreie und zerstörungsarme Verfahren zur Bauwerksdiagnose mineralischer Baustoffe in situ*. Technische Universität Graz, 2006
- [41] RAUPACH M., DAUBERSCHMIDT C., WOLFF L., HARNISCH J.: *Monitoring der Feuchteverteilung in Beton*. In: Beton 57 (2007), Nr. 1+2, S. 20-26

- [42] RAUPACH M., HARNISCH J.: *Messsysteme für die tiefengestaffelte kontinuierliche Feuchtemessung von historischem und neuzeitlichem Mauerwerk*. Forschungsbericht F 919, Institut für Bauforschung Aachen, 2008
- [43] RAUPACH M., WEYDERT R.: *Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonböden mit Einbausensoren*. In: Tagungsband Industrieböden 1999, 4. Internationales Kolloquium 12.-14. Januar 1999
- [44] RIECHE G.: *Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen*. Frauenhofer IRB Verlag, 2004
- [45] RIZKALLAH V.: *Bauschäden im Hoch- und Tiefbau - Standardwerk zur Schadenserken- nung und Schadensvermeidung; Band 1: Tiefbau*. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007
- [46] RIZKALLAH V.: *Bauschäden im Hoch- und Tiefbau - Standardwerk zur Schadenserken- nung und Schadensvermeidung; Band 2: Hochbau*. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009
- [47] SCHEFFLER G. A., PLAGGE H.: *Ein Trocknungskoeffizient für Baustoffe*. In: Bauphysik 31 (2009), Heft 3, S.125-138
- [48] SCHÄFFLER H., BRUY E., SCHELLING G.: *Baustoffkunde*. Vogel Buchverlag, Würz- burg, 2000
- [49] SCHIESSL P.: *Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde - Teil A: Allgemeine Grundlagen*. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Technische Universität München, 2006
- [50] SCHÖNBURG KURT: *Schäden an Sichtflächen - Bewerten, beseitigen, vermeiden*. Frauen- hofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [51] SETZER M. J., AUBERG R., HARTMANN V.: *Bewertung des Frost-Tausalz- Widerstandes von Transportbeton*. Universität - Gesamthochschule Essen, Forschungs- bericht aus dem Fachbereich Bauwesen 62, 1994
- [52] WEBER J.: *Bauwerksabdichtung in der Altbausanierung - Verfahren und juristische Betrachtungsweise*. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008
- [53] WERNECKE R.: *Industrielle Feuchtemessung - Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2003
- [54] WESCHE K.: *Baustoffe für tragende Bauteile; Band 1: Grundlagen*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1996
- [55] WEYHE S.: *Bauschadensprophylaxe als Beitrag zur Qualitätssicherung während der Bauausführung*. Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [56] WIESE S., KOWALSKY W., WICHERN J., GRAHN W.: *Neuartige faseroptische Feuchtesensoren zur zerstörungsfreien Langzeitüberwachung von Betonbauwerken*. TU Braunschweig; in: Feuchtetag'99, 7./8. Oktober 1999, BAM, Berlin
http://www.dgzfp.de/Portals/24/PDFs/BBonline/bb_69-CD/bb69-m4.pdf,
[Stand 10.10.2009]

Quellenverzeichnis-Internet

- [57] Wikipedia-Onlinelexikon, Diffusion, [Stand 19.10.2009]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Diffusion&oldid=65630199>
- [58] Wikipedia-Onlinelexikon, Schwinden (Beton), [Stand 26.10.2009]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwinden_%28Beton%29&oldid=54040052
- [59] Wikipedia-Onlinelexikon, Wasser, [Stand 27.10.2009]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wasser&oldid=66032016>
- [60] Wikipedia-Onlinelexikon, Wasserstoffbrückenbindung, [Stand 27.10.2009]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wasserstoffbrückenbindung&oldid=65568376>
- [61] Wikipedia-Onlinelexikon, Mikrowellen-Messverfahren, [Stand 04.11.2009]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mikrowellen-Messverfahren&oldid=60656599>
- [62] Wikipedia-Onlinelexikon, Delphin, [Stand 06.11.2009]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Delphin_%28Software%29&oldid=60804209
- [63] Google-Bilder, Thermographie, [Stand 06.11.2009]
<http://www.vpb.de/download/Thermografie-FassadeAltbau.jpg>
- [64] Homepage: ATP Messtechnik GmbH, [Stand 16.11.2009]
<http://www.atp-messtechnik.de/>
- [65] Homepage: Laserliner Schweiz AG, [Stand 16.11.2009]
<http://www.laserliner.ch/>
- [66] Homepage: Messbar, [Stand 16.11.2009]
<http://www.messbar.de/>
- [67] Homepage: PCE Deutschland GmbH, [Stand 16.11.2009]
<http://www.pce-group-europe.com/deutsch/>
- [68] Homepage: hf sensor GmbH, [Stand 17.11.2009]
<http://www.hf-sensor.de/deutsch/index.html>
- [69] Homepage: Mettler-Toledo GmbH, [Stand 17.11.2009]
<http://de.mt.com/de/de/home.html>
- [70] Homepage: Trotec GmbH & Co. KG, [Stand 17.11.2009]
<http://www.trotec.de/de/startseite/>

- [71] Homepage: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, [Stand 23.11.2009]
http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/home.html
- [72] Homepage: Q NET Engineering GmbH, [Stand 23.11.2009]
<http://www.q-net.de/index.html>
- [73] Homepage: GeoBau-Controlling GmbH, [Stand 26.11.2009]
<http://www.geobau-gmbh.de/index.html>
- [74] Homepage: IMKO GmbH, [Stand 26.11.2009]
<http://www.imko.de/DE/>
- [75] Wikipedia-Onlinelexikon, Feuchtemessung mit TDR, [Stand 26.11.2009]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Feuchtemessung_mit_TDR&oldid=49686237
- [76] Homepage: TTI GmbH - TGU Smartmote, [Stand 30.11.2009]
<http://www.smartmote.de/>
- [77] Homepage: Wirtschaftskammer Österreich, [Stand 11.01.2010]
<http://wko.at/statistik/eu/europa-wirtschaftsleistung.pdf>
- [78] Wikipedia-Onlinelexikon, Ausblühung, [Stand 01.02.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ausbl%C3%BChung&oldid=67368651>
- [79] Wikipedia-Onlinelexikon, Feuchtigkeitsschaden, [Stand 01.02.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Feuchtigkeitsschaden&oldid=70043164>
- [80] Wikipedia-Onlinelexikon, Schimmelpilz, [Stand 01.02.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schimmelpilz&oldid=69539580>
- [81] Homepage: Troxler Electronics GmbH, [Stand 24.02.2010]
<http://www.troxlerlabs.com/index.shtml>
- [82] Wikipedia-Onlinelexikon, Messung, [Stand 24.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Messung&oldid=72206127>
- [83] Wikipedia-Onlinelexikon, Bruttoinlandsprodukt, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bruttoinlandsprodukt&oldid=72249288>
- [84] Wikipedia-Onlinelexikon, Dielektrikum, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Dielektrikum&oldid=69770373>
- [85] Wikipedia-Onlinelexikon, Dielektrizitätskonstante, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Permittivit%C3%A4t&oldid=72317219>
- [86] Wikipedia-Onlinelexikon, Exsikkator, [Stand 25.03.2010]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Exsikkator_%28Chemie%29&oldid=70473246

- [87] Wikipedia-Onlinelexikon, Kapazität, [Stand 25.03.2010]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektrische_Kapazit%C3%A4t&oldid=69364880
- [88] Wikipedia-Onlinelexikon, Koaxialkabel, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Koaxialkabel&oldid=72032932>
- [89] Wikipedia-Onlinelexikon, Kondensator, [Stand 25.03.2010]
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kondensator_%28Elektrotechnik%29&oldid=72334008
- [90] Wikipedia-Onlinelexikon, Logger, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datenlogger&oldid=71315098>
- [91] Wikipedia-Onlinelexikon, Oszilloskop, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Oszilloskop&oldid=72110779>
- [92] Wikipedia-Onlinelexikon, Polymermatrix, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Polymer&oldid=71584881>
- [93] Wikipedia-Onlinelexikon, Reflektometer, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Reflektometer&oldid=59433433>
- [94] Wikipedia-Onlinelexikon, Spektrometer, [Stand 25.03.2010]
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spektrometer&oldid=63076199>

