

BBSR-
Online-Publikation
14/2024

Multifrequenz-Reflektometrie zur Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes im Mauerwerk

von

Prof. Dr. Alexandra Troi
Prof. Dr. Klaus Drese
Oliver Blaschke
Felix Brand
Daniel Frenzel
Franziska Haas
Dr. Christoph Franzen

Multifrequenz-Reflektometrie zur Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes im Mauerwerk

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.49

Projektlaufzeit: 02.2021 bis 05.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Prof. Dr.-Ing. Alexandra Troi
alexandra.troi@hs-coburg.de

Prof. Dr.-Ing. Klaus Drese
Oliver Blaschke, M. Eng.
Felix Brand, M. Eng.
Daniel Frenzel, M. Sc.
Dipl.-Ing. Franziska Haas

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V.
Dr. Christoph Franzen
franzen@idk-denkmal.de

Redaktion

Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Prof. Dr.-Ing. Alexandra Troi

Stand

April 2024

Gestaltung

Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg
Daniel Frenzel, M. Sc.

Bildnachweis

Titelbild: Dr. Christoph Franzen
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 97

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Troi, A.; Drese, K.; Blaschke, O.; Brand, F.; Frenzel, D.; Haas, F.; Franzen, C., 2024: Multifrequenz-Reflektometrie zur Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes im Mauerwerk. BBSR-Online-Publikation 14/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
Einführung	9
Themenfeld	9
Untersuchungsgegenstand	9
Problemstellung	11
Baupraxis	11
Stand der Forschung / physikalischer Hintergrund	13
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	14
Zielstellung	16
Konkrete Projektziele	16
Forschungsdesign	17
Arbeitshypothesen	17
Methodischer Ansatz	18
Arbeitspakete und allgemeiner Projektablauf	19
Grundlegende Vorüberlegungen	22
Recherche und Beschaffung eines kommerziellen Radarmoduls	22
Recherche zu bisherigen analytischen Auswerteverfahren zur Feuchtigkeitsbestimmung	22
Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der Experimente	24
Radarsonden und erste Probemessungen an Testkörpern	26
Versuchsplanung	31
Optimiertes Simulationsmodell zur Dimensionierung der Mauerwerksprüfkörper	31
Versuchsplanung Mauerwerk	32
Konstruktion und Aufbau der Probekörper	32
Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes	38
Delphinsimulationen	40
Festlegung Anzahl der zu untersuchenden Feuchtestufen und Salzbelastungen	44
Versuchsplanung Einzelsteine und kleine Prüfkörper	46
Versuchsdurchführung	49
Bewässerung und Bestimmung des Feuchtegehaltes der Mauerwerksprüfkörper	49
Entnahme von Bohrmehlproben und Bestimmung der Materialfeuchte mit dem Darr-Verfahren	49
Vermessung vorhandener Testkörper mit dem Radarmodul	51
Flächenscans an den unterschiedlichen Mauerwerkstypen (konzertierte Messkampagnen)	52
Bewässerung und Bestimmung des Feuchtegehaltes an Einzelsteinen	55
Messungen an ausgewählten, realen und historischen Mauerwerken	57
Nürnberger Staatsarchiv	58
Nürnberg Grundschule St. Johannis	59
Historisches Wohnhaus in Hohenpölz (fränkische Schweiz)	60
Auswertung	62
Indirektes Messverfahren über den elektrischen Widerstand der eingebauten Elektroden	62

Bestimmung des absoluten Wassergehaltes	63
Verarbeitung der Radardaten	63
Machine Learning Modell (Neuronales Netz)	67
Ergebnisse	71
Messergebnisse der Einzelsteine	71
Messergebnisse der Mauwerksprüfkörper	75
Messergebnisse der konzertierten Messkampagnen	80
Messergebnisse an realen Objekten	87
Zusammenfassung und Ausblick	90
Publikationen	92
Mitwirkende	93
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	93
Literaturverzeichnis	94
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	102

Kurzfassung

Eine zerstörungsfreie, zuverlässige und aussagekräftige Bewertung der Feuchte und des Salzgehaltes im Bauwerk vor Ort würde die Analyse von Schäden und deren Ursache deutlich erleichtern, die Qualität der Sanierung verbessern und Bestandsgebäude – im Sinne der Nachhaltigkeit - für die Zukunft sichern.

Auf dem Markt verfügbare Hand-Held-Geräte geben nur indirekte Feuchtwerte und werden von vorhandenen Salzen verfälscht. Zudem ist die Eindringtiefe (Messtiefe) stark eingeschränkt. Eine brauchbare Interpretation der Messergebnisse muss daher mit einer anschließenden, gezielten Probenahme ergänzt werden. Als heutiger Goldstandard für die Messungen des Feuchte- und Salzgehaltes im Mauerwerk gilt die Gravimetrie bzw. die Darr-Methode (EN 16682). Hier muss jedoch invasiv in die Bausubstanz eingegriffen werden, da für die Analyse im Labor Probenmaterial zur Verfügung stehen muss. Vor allem an Arbeiten im historischen Bestand stellt die destruktive Probennahme oft ein großes Problem dar und wird deshalb häufig vermieden. Zudem spielt hier auch der Faktor Zeit eine große Rolle, da das entnommene Probenmaterial in einem dafür ausgelegten Labor untersucht werden muss. Ein Monitoring über einen längeren Zeitraum lässt sich mit dieser Methode ebenfalls kaum durchführen oder ist nur unter erheblichem Substanzverlust möglich.

Verschiedene Forschungsprojekte haben sich schon mit elektromagnetischen Messungen auseinandergesetzt und die salzunabhängige Messung des Feuchtegehaltes durch das Auswerten der komplexwertigen Permittivität bereits bestätigt. Oft wurde dabei nur bei einer festen Frequenz gemessen oder es wurde nur ein Material (oft Beton) betrachtet. Auch die große Varianz an unterschiedlichen Baumaterialien und Konstruktionen in historischen Gebäuden, die die Permittivität zusätzlich beeinflussen können, wurde oft vernachlässigt. Zudem wird die Datenauswertung oft als sehr kompliziert und aufwändig betrachtet, wobei die Qualität der Datenauswertung einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Das Projekt verfolgt den Ansatz einer breitbandigen Radarreflexionsmessung an Mauerwerksverbänden. Über das gezielte Einkoppeln von Radarwellen über ein breites Frequenzband soll über das reflektierte Signal Aussagen zum Feuchtezustand und der Salzbelastung in dem vorherrschenden Mauerwerk getroffen werden. Dabei wird der Real- und Imaginärteil der komplexwertigen Permittivität ermittelt und ausgewertet. Über ein KI-basiertes Auswerteverfahren mit Machine Learning Algorithmen wurde ein Ansatz zur Auswertung der generierten Messdaten entwickelt.

Im Zuge des Projekts wurden an eigens dafür entwickelten Laborprüfständen das Prinzip der Multifrequenz-Radarreflektometrie überprüft und die Ergebnisse auf ihre Belastbarkeit hin untersucht. Dazu wurden mehrere mobile, bauwerkstypische Mauerwerksmodelle aus zwei unterschiedlichen Materialien konstruiert und aufgebaut. Die verwendeten Baumaterialien sollen dabei weitestgehend historischen Ansprüchen genügen. Die Prüfkörper wurden dann in verschiedenen Feuchtezuständen (hygroskopischer und überhygroskopischer Bereich) versetzt und später auch mit unterschiedlichen Salzen in wechselnden Konzentrationen belastet. Gleichzeitig wurden noch ergänzende Messungen und Tests an einzelnen Bausteinen durchgeführt. Um den engen und straffen Zeitplan des Projekts einhalten zu können, wurden bereits im Vorfeld mittels einer validierten, hygrothermischen Simulationssoftware (Delphin, Bauklimatik Dresden) der Feuchte- und Salztransport im Mauerwerk berechnet und simuliert. Mit diesen Simulationserkenntnissen kann die Zeitdauer, in denen die Mauerwerksproben dem Wasser ausgesetzt werden müssen abgeschätzt, und optimiert werden.

Die im Labor generierten Messdaten und Ergebnisse sollen mit Messungen an ausgewählten realen, historischen Mauerwerken abgeglichen werden. Das entwickelte Messverfahren soll unter realen Bedingungen getestet und ausgewertet werden. Neben der Messgenauigkeit sollen unter praxisnahen Bedingungen auch die Stärken und Schwächen des neuen Messverfahrens quantifiziert werden.

Ziel des Projekts ist es, ein ortsaufgelöstes und salzunabhängiges Messverfahren zur Bestimmung der Baufeuchte zu entwickeln. Das Verfahren soll nicht invasiv sein und neben punktuellen Messungen auch große Flächen einfach und in kurzer Zeit vermessen können.

Abstract

Retrofitting and renovation of the building stock, including heritage buildings, is an important step of energy saving. Prior to any construction project, the actual state of the building is to be determined. Here the knowledge on distribution and amount of moisture and salt in the masonry is a key action.

Hand-held devices available on the market only give indirect moisture values and are strongly influenced by existing salts. In addition, the measurement depth of these devices is severely limited. A useful interpretation of the measurement results must therefore be supplemented with subsequent, targeted sampling. Gravimetric moisture measuring method or the Darr method (EN 16682) is considered today's gold standard for measuring the moisture and salt content in masonry. However, this requires invasive intervention in the building fabric, as sample material must be available for analysis in the laboratory. Destructive sampling is often a big problem, especially when working on historical structures, and is therefore frequently avoided. In addition, the time factor also plays a major role here, as the sample material taken must be analysed in a laboratory designed for this purpose. Monitoring over a longer period is also hardly realisable with this method or is only possible with considerable loss of substance.

Various research projects have already dealt with electromagnetic measurements and have confirmed the salt-independent measurement of the moisture content by evaluating the complex-valued permittivity. Often, measurements were only made at a fixed frequency or only one material (often concrete) was considered. The large variance of different building materials and constructions in historical buildings, which can additionally influence the permittivity, was also often neglected. In addition, data evaluation is often considered very complicated and time-consuming, with the quality of the data evaluation having a major impact on the results.

The project pursues the approach of multi-frequency radar reflectometry on masonry structures. The targeted coupling of multifrequency radar waves is intended to provide information on the moisture condition and salt load in the prevailing masonry via the reflected signal. The real and imaginary parts of the complex-valued permittivity are determined and evaluated. An approach for evaluating the generated measurement data was developed using an AI-based evaluation procedure with machine learning algorithms that only requires a minimum of user interaction.

In the course of the project, the principle of broadband reflectometry was tested on specially developed laboratory test masonries and the results were examined for their resilience. For this purpose, several mobile masonry models typical of historic buildings were constructed and set up from two different materials. The building materials used should meet historical requirements as far as possible. The test specimens were then placed in different moisture conditions (hygroscopic and superhygroscopic range) and later also loaded with different salts in changing concentrations. At the same time, additional measurements and tests were carried out on individual stone bricks. In order to be able to keep to the tight schedule of the project, the moisture and salt transport in the masonry was calculated in advance using validated hygrothermal simulation software (Delphin, Bauklimatik Dresden). With this simulation knowledge, the time during which the masonry samples must be exposed to water can be estimated and optimised.

The measurement data and results generated in the laboratory are to be compared with measurements on selected real, historical masonry. The developed measurement procedure is to be tested and evaluated under real conditions. In addition to the measurement accuracy, the strengths and weaknesses of the new measurement procedure are to be quantified under practical conditions.

The aim of the project is to develop a spatially resolved and salt-independent measurement procedure for determining building moisture. The method should be non-invasive and, in addition to point measurements, also be able to measure large areas easily and in a short time.

Liste der verwendeten Abkürzungen:

Rein-D	Reindichte
Roh-D	Rohdichte
WAa	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck
WAv	Wasseraufnahme unter Vakuum
W_{sat}	Sättigungsfeuchte
W_{80}	hygroskopische Wasseraufnahmefähigkeit
w-Wert / Aw-Wert	Wasseraufnahmekoeffizient

Abkürzung physikalischer Größen

M-%	Masseprozent [%]
Vol. %	Volumenprozent [%]
C_p	spezifische Wärmekapazität [J/kg*K]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstand [m]

Einführung

Ca. 64 % des deutschen Gebäudebestandes wurde vor 1987 und somit ohne verpflichtende Berücksichtigung von Energieeffizienzstandards errichtet (siehe Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)). Im Kampf gegen die globale Herausforderung des Klimawandels ist deshalb die energetische Sanierung im Gebäudebestand einer der stärksten Hebel, um die Klimaziele zu erreichen. Feuchtelasten an den Gebäuden sind dabei in mehrfacher Hinsicht problematisch. Insbesondere historische Gebäude, aber auch alle anderen Bestandsgebäude, deren erdberührende Fundamente nicht mit einer voll funktionierenden Dichtungsschicht versehen sind, sind fast immer von aufsteigender Feuchte im Mauerwerk, verbunden mit gelösten Salzen belastet.

Das geht sowohl über die formal denkmalgeschützten Kulturgüter und Gebäude als auch über erhaltenswerte Gebäude (DIN EN 16883:2017-08) die unter keinem gesonderten Schutz stehen, hinaus. Europaweit zählen hierzu ~ 25 % des Wohnungsbestandes und für Deutschland fast 10 Millionen Wohnungen. Bei der Sanierung dieses immensen Wohnungsbestandes sollte stets eine Beurteilung von feuchten und salzbelasteten Wänden vorgesehen werden, um zielführende Sanierungsmaßnahmen einleiten zu können. Hierbei handelt es sich meistens um Naturstein(schicht-) und Ziegelmauerwerke. Falsche bzw. zu späte Beurteilung der Schäden, da diese nicht immer zwingend an der Wandoberfläche gleich erkennbar sind, verursacht hohe Folgekosten in der Instandsetzung. Ferner können oft historische sowie denkmalgeschützte Bausubstanzen von dieser Belastung dauerhaft und unwiderruflich zerstört werden.

Themenfeld

Die nach heutigem Stand zuverlässigsten Messmethoden von Feuchte- und Salzbelastungen im Bestand beruhen auf invasiven Probeentnahmen mit darauf folgenden Untersuchungen, wie der Darr-Methode und der CM-Methode. Da hier zerstörende Eingriffe in die bestehende Bausubstanz zwingend notwendig sind, ist die Anwendbarkeit, insbesondere an historischen Gebäuden, meist stark eingeschränkt. Zudem lassen diese Verfahren nur eine punktuelle Aussage über die aktuelle Belastungssituation zu und sind sehr zeitintensiv, bedingt durch die Probenentnahme vor Ort mit anschließender Analyse mit portablen Chemiekoffer bzw. nach Untersuchung in einem Labor. Eine Analyse der vorhandenen Schadsalze erfolgt in gesonderten Analysen über angesetzte Eluate aus den entnommenen Proben.

Der Bedarf nach zerstörungsfreien, instant auswertbaren vor-Ort Messverfahren, die in kurzer Zeit größere Wandflächen untersuchen und analysieren können, um eine genaue Vorstellung über die Schadenssituation, im Sinne von örtlicher Verteilung und zeitlicher Veränderung zu bekommen, ist sehr groß. Insbesondere auch bei Arbeiten im historischen Bestand.

In den letzten Jahrzehnten wurden schon einige moderene „hand-held“-Techniken entwickelt, mit denen über einen auf die Substanz gehaltenen Messkopf ein Wert von einem Display abgelesen werden kann. Diese Werte sind oftmals nicht sehr zuverlässig und nur bedingt belastbar. Diese Messgeräte bedienen sich dabei unterschiedlicher physikalischer Messmethoden, die im Kapitel Baupraxis etwas genauer erläutert werden. Oft sind die gewonnenen Feuchtemessergebnisse dieser Messgeräte stark vom vorhandenen Salzgehalt im untersuchten Baustoff abhängig, da dieser das Messergebnis maßgeblich beeinflusst.

Untersuchungsgegenstand

Mit Hilfe der Reflektometrie von Radarwellen wird eine Aussage über den getrennten Feuchte- und Salzgehalt im Bauteil getroffen. Dies geschieht über die Auswertung des Real- und Imaginärteils der Permittivität über ein breites Frequenzband. Mit Hilfe moderner Auswerteverfahren aus der Signalverarbeitung und Machine Learning Algorithmen wird die Evaluation der generierten Daten genauer und deutlich benutzerfreundlicher, sodass nur noch wenige Parameter selbstständig eingegeben werden müssen. Somit lassen sich über die gewonnenen Messinformationen Rückschlüsse auf die Größen ziehen, die die Permittivität beeinflussen.

Das Messprinzip, basierend auf der Einkopplung von elektromagnetischer Strahlung wurde, wie später noch beschrieben wird, schon in verschiedenen Studien getestet und validiert. Dabei werden häufig nur eine Frequenz bzw. nur ein Material (vorwiegend Beton) betrachtet. Zudem wird die Auswertung der gewonnenen Daten als sehr komplex angesehen.

Moderne GPR-Module (Ground Penetrating Radar) können über ein breites Frequenzband Radarstrahlen emittieren und bei Rückreflexion wieder detektieren. Dabei stehen neu entwickelte Auswertealgorithmen zur Verfügung, welche die Auswertung der Daten deutlich erleichtert.

Untersuchungsgegenstand des Projekts ist es, nun auch an "historischen" Mauerwerken und unterschiedlichen Materialien das Verfahren, basierend auf der Reflexionsmessung von Radarwellen zu validieren und die Belastbarkeit der Messergebnisse zu überprüfen.

Problemstellung

Um in naher Zukunft Bauwerke dauerhaft und nachhaltig sichern zu können, ist eine exakte Bestimmung der Feuchte- und Salzbelastung im Mauerwerk zwingend notwendig. Ständiger Wechsel zwischen feucht und trocken, saurer Regen und die Wirkung von Salzkristallisation können die innere Struktur von mineralischen Baustoffen schwächen und wichtige Materialeigenschaften wie die Druckfestigkeit verändern. Das Zusammenspiel von Salzkristallisation und Salzlösung führt zu immensen Schäden und ist häufig die Ursache für Strukturschwächen von Baustoffen. Steigende Luftfeuchtigkeit und Mauerfeuchte (die in dieser Studie untersucht wurden) können die Druckfestigkeit von Sandstein und anderen Baustoffen erheblich verringern. Nach dem aktuellen Stand der Technik arbeiten nur invasive Messverfahren zuverlässig. Diese aber haben den großen Nachteil, zerstörend in die Bausubstanz eingreifen zu müssen. Zudem erfordern sie viel Zeit, da Probematerial zunächst entnommen und später in einem Labor untersucht werden muss. Deshalb wird oft auch eine Analyse der Ist-Situation nicht durchgeführt, was neben ästhetischen Beeinträchtigungen auch strukturelle Probleme mit sich bringen kann (Adamowski et al. 2005, DIN EN 16682:2017-05). Außerdem sind die destruktiven Messungen auch immer „Punktmessung“ – im Ort und in der Zeit. Für die richtige Interpretation der Situation und die Bestimmung der Schadensursache ist es hingegen wesentlich zu verstehen, wie Feuchte und Salz verteilt sind (z.B. ob es sich um aufsteigende Feuchtigkeit oder andere Ursachen handelt) und wie sie sich ggf. auch über der Zeit ändern (Winter/Sommer). Ein zerstörungsfreies und zuverlässiges vor-Ort-Messverfahren, mit dem in relativ kurzer Zeit große Wandflächen untersucht und analysiert werden können, würde diese Schwächen überwinden. Dieses würde sowohl eine zeitliche als auch örtliche Analyse der Feuchtigkeitsverteilung erlauben und somit die Bewertung der Feuchtigkeitsursachen sowie deren Behebung vereinfachen. Eine zuverlässige und aussagekräftige Bewertung am Bauwerk kann die Qualität der Sanierung für einen immensen Sanierungsbestand deutlich konstruktiv und energetisch verbessern und somit die Bestandsgebäude für die Zukunft sichern.

Baupraxis

Direkte Verfahren (gravimetrische Feuchtemessung)

Die derzeit einzig zuverlässige Methode, um im Baubestand Feuchte nachzuweisen, liegt in der Beprobung und dem folgenden gravimetrischen Nachweis (DIN EN 16682:2017-05; WTA 2002) der Proben im Labor oder der Untersuchung der Proben mittels eines chemischen Verfahrens (CM-Methode) vor Ort, wofür beispielsweise ein kleines Kofferlabor sowie Erfahrung damit notwendig ist. Dabei muss zwingend zerstörend in die Bausubstanz eingegriffen werden, um zunächst das Probematerial zur Analyse zu gewinnen. Ein großer Vorteil der Methodik liegt in der Möglichkeit zur tiefenabhängigen Untersuchung, in dem Probematerial aus den unterschiedlichen Tiefen getrennt gewonnen und analysiert wird. Das unterscheidet diese Technik von den allermeisten anderen Untersuchungsmethoden. Die Möglichkeit in der Fläche, bspw. in Abhängigkeit der Höhe Analysen vorzunehmen ist ebenfalls möglich. Es handelt sich allerdings immer noch um eine punktuelle, in Ort und Zeit festgesetzte Messungen. Eine Untersuchung einer größeren Fläche über einen längeren Zeitraum ist selten realisierbar oder nur mit einem erheblichen Substanzverlust verbunden.

Eine weitere Chance liegt in der Tatsache, aus dem gewonnenen Probematerial unabhängig zur Feuchteanalyse auch eine Analyse der Salzgehalte durchzuführen und die Interpretation daran zu orientieren.

Somit ist die Darr-Methode (DIN EN ISO 12570:2018-07) das Referenzverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in Baustoffen und dient auch als Kalibrierung aller anderen Feuchtemessverfahren. Dieses invasive Standardverfahren erlaubt zwar eine quantitative Aussage zum Feuchtegehalt und dem Vorhandensein von Salzen, kann aber aufgrund des zerstörenden Charakters nur stark eingeschränkt bei historischem Mauerwerk eingesetzt werden (Goetzke-Pala et al. 2018; Hola 2017).



Foto: Franziska Haas

Abbildung 1: Invasive Probenentnahme durch Gewinnung von Bohrmehlproben. Für den gravimetrischen Nachweis einer Feuchtebelastung müssen über Bohrungen Materialproben entnommen werden, die dann anschließend im Labor ausgewogen und getrocknet werden. Die Methode bietet den Vorteil einer tiefengestaffelten Auflösung der gewonnenen Ergebnisse. Diese Methode stellt aktuell noch den Goldstandard im Bereich der Feuchtemessung dar.

Indirekte Verfahren

Häufig werden zur Feuchtemessung in historischem Mauerwerk Mikrowellen bzw. dielektrische sowie elektrische und kapazitive Messmethoden eingesetzt. Abhängig vom Baumaterial und des eingesetzten Messsystems ist dabei eine Messung bis zu einer Tiefe von 30 cm möglich. Diese nicht-invasiven „hand-held“-Techniken scheitern bisher an der Zuverlässigkeit der Messergebnisse. Im Mauerwerk integrierte Systeme, wie Sensoren zur Messung der relativen Feuchte oder die Messung des elektrischen Widerstandes mittels Elektroden liefern ebenfalls keine zuverlässigen Aussagen zum absoluten Feuchtegehalt in der Wand. Als Messwert wird oft ein entsprechender Feuchtindexwert (zwischen 15 und 100 digits) ausgegeben, aus dem dann ein möglicher Feuchtwert berechnet werden kann.

Moderne „hand-held“-Techniken, bei denen ein Messkopf auf die Substanz gehalten wird und von einem Display ein Wert abgelesen werden kann, wurden in den vergangenen Dekaden entwickelt. Solche Geräte sind für wenige hundert Euro auf dem Markt erhältlich. Leider jedoch ist eine Belastbarkeit bzw. Zuverlässigkeit der abzulesenden Werte kaum gegeben. Einzelne Geräte scheitern daran, reproduzierbare Wiederholungsmessungen durchführen zu können. Zwischen Messungen mit verschiedenen Geräten besteht kaum ein systematischer Zusammenhang (Bayer et al. 2010), was insbesondere damit zu begründen ist, dass aus den Messdaten bei einer Frequenz nicht mehrere Messgrößen wie Feuchte und Salz extrahiert werden können. In Anbetracht dessen geben die Hersteller dem Kunden auch nicht direkt einen Feuchtwert an, sondern das Gerät zeigt einen generierten Feuchtindexwert an, aus dem dann ein Feuchtwert abgeschätzt werden könnte. Dieser Feuchtwert ist jedoch in Anwesenheit von Salzen kaum verwendbar. Diese Einschätzung wird seit Jahrzehnten von Fachleuten geteilt (Leschnik 1999). Als unvollständige freie Beispiele

seien hier Geräte von Gann, sogenannte Gann-Hydromette mit kapazitivem Sensor, oder hf-Messgeräte, welche Mikrowellen bei 2,45 GHz verwenden, genannt.

Stand der Forschung / physikalischer Hintergrund

Messungen mit elektromagnetischen Wellen machen sich die starken Unterschiede in der komplexwertigen Dielektrizitätszahl (Permittivität) zwischen Wasser und Baustoffen zunutze.

Dabei wird die Dielektrizitätszahl mit folgender Formel beschrieben:

$\epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon''$	(1)
---	-----

Der Realteil ϵ' beschreibt dabei den Brechungsindex, während der Imaginärteil ϵ'' die Absorption bzw. Dämpfung beschreibt.

Weitgehend frequenzunabhängig gilt für trockene Baustoffe $\epsilon' \approx 3 \dots 7$ und $\epsilon'' \approx 0$. Wasser dagegen zeigt eine starke Frequenzabhängigkeit in seiner komplexwertigen Permittivität zwischen 0,5 und 17 GHz und weist deutlich höhere Werte im Vergleich zu Baustoffen auf (siehe Abbildung 2). Ausschlaggebend ist hier vor allem die sogenannte Relaxationsfrequenz, die für freies Wasser bei etwa 16 GHz liegt. Diese verschiebt sich in Wasser-Feststoff-Verbänden oft zu niedrigeren Frequenzbereichen (Hoekstra und Delaney 1974).

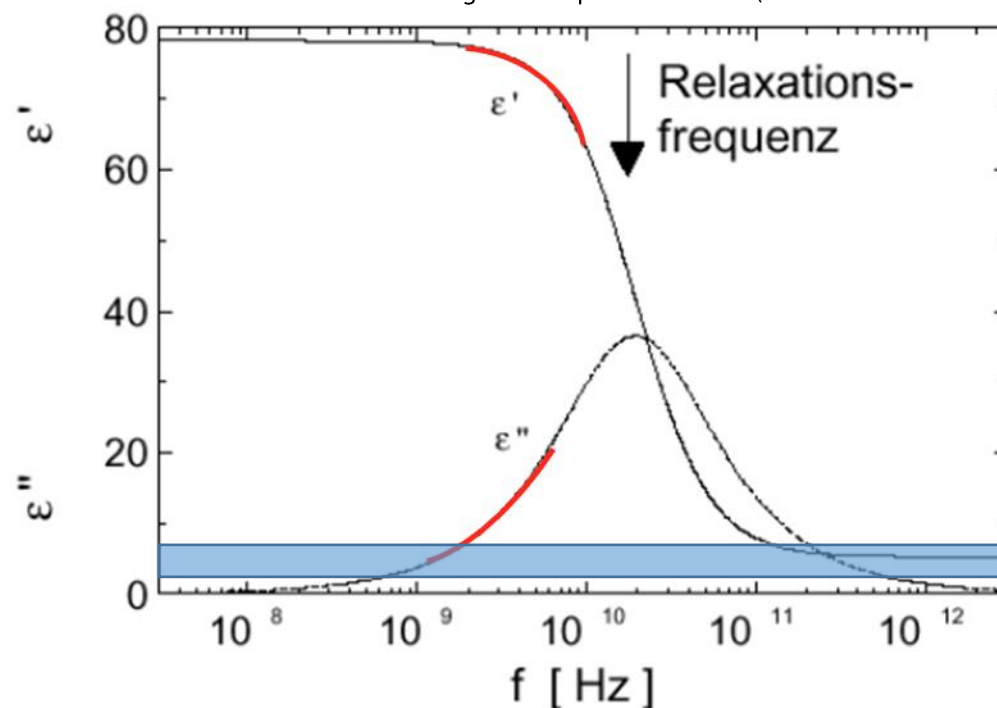


Abbildung 2: Realteil ϵ' und Imaginärteil ϵ'' der komplexen Dielektrizitätszahl von Wasser bei 25°C in Abhängigkeit von der Frequenz nach (Leschnik 1999). In hellblau ist der Bereich eingezeichnet, in dem sich die Werte für den Realteil ϵ' für die meisten Baustoffe befinden. Der Imaginärteil ϵ'' liegt bei etwa 0.

Das unterschiedliche Baumaterialien mittels der komplexwertigen Dielektrizitätszahl beschreibbar sind, wurde bereits durch Hasted und Shah 1964 oder durch Pisa et al. 2017 gezeigt.

Eine grundlegende Arbeit von Leschnik aus dem Jahr 1999 (Leschnik 1999) legt dar, dass durch Messungen bei einer Frequenz eine Reihe von Informationen über Salz und Wasser gewonnen werden können. In dieser Studie wurde gezeigt, dass bis zu einer Frequenz von 100 MHz der Einfluss von Salz und Feuchte auf sowohl Real- als auch Imaginärteil von ϵ (Permittivität) so ähnlich ist, dass man den Salzeinfluss und den Feuchteinfluss nicht voneinander trennen kann. Ab 100 MHz sinkt der Einfluss der Salze – insbesondere auf den Realteil von ϵ – deutlich. Durch Bestimmung der Feuchte über ϵ' (Realteil) aus Resonanzfrequenz und des Salzgehaltes aus der Güte/Halbwertsbreite der Feuchte-Salz-Kombination in ϵ'' (Imaginärteil) können Salzeinfluss und Feuchteinfluss unterschieden werden. Letztere wird im hohen Feuchtebereich laut Autoren

recht ungenau, so dass deren Beurteilung nach der erreichbaren Auflösung der Salzmessung stark vom benutzten Messgerät abhängen wird.

Eine weitere Studie von Maierhofer und Wöstmann (Maierhofer und Wöstmann 1998) zeigt, dass sich bei 7 GHz unterschiedliche Mauerwerke bei Feuchte unterschiedlich verhalten (Auswertung des Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante). Insbesondere ist diese Studie eine der wenigen Arbeiten, die vergleichend unterschiedliche Mauerwerke untersucht. Die Autoren zeigen aber auch, dass bei unterschiedlichen Materialien alle Werte in einem ähnlichen Dielektrizitätsbereich liegen. Zudem wird in der Studie dargestellt, dass die Steigungen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Feuchtegehalten im Realteil unterschiedlich sind, aber z.B. im Imaginärteil ähnlich verlaufen. Trotzdem ist es laut der Untersuchungen der Autoren möglich, unabhängig vom Salzgehalt innerhalb eines Mauerwerktyps die Feuchtigkeit zu bestimmen. Eine weitere Untersuchung der Autorin Maierhofer aus 2008 zeigt auf, dass über den Einsatz von Radar eine Bestandsaufnahme zur Feuchtigkeitsbestimmung in Gebäudewänden möglich ist. Die Autorin beschreibt aber die Datenverarbeitung als sehr aufwendig und komplex. (Maierhofer et al. 2008)

In der Arbeit von Krause et al. 2007 wird dargelegt, wie man durch gleichzeitige Bestimmung des Real- und Imaginärteils der Dielektrizitätskonstante (bei 1 GHz) in der Lage ist, Feuchte und Salzgehalt voneinander zu trennen (siehe Guilbert et al. 2021).

Das insbesondere bereits in der Baupraxis etablierte Ground Penetrating Radar (GPR) für die Bestimmung von Salz und Feuchte geeignet ist, zeigen ebenfalls unterschiedliche Studien. So wird in dem in Du Plooy et al. 2015 aufgeführten Methodenvergleich gezeigt, dass GPR-Messsignale (Frequenzbereich 1,5-2,6 GHz) sowohl gegenüber Salz als auch gegenüber Feuchte empfindlich sind und das eine Kombination unterschiedlicher Messungen bei verschiedenen Frequenzen viel Potential aufweist, um die Qualität der Aussagen über Salz und Feuchte im Mauerwerk weiter zu verbessern. Dieselbe Arbeitsgruppe weist auch nochmals in einer Studie aus 2017 nach, dass durch eine Multifrequenzanalyse mittels GPR-Radar im Frequenzbereich 0,1-0,9 GHz eine Unterscheidung von Chlorid und Feuchte möglich ist (Dérobert und Villain 2017). Diese Untersuchungen wurden jedoch nicht an historischem Mauerwerk, sondern nur an Beton durchgeführt.

Auch weiterführende Studien wie Hugenschmidt und Loser 2008, Kalogeropoulos et al. 2011, Ihamouten et al. 2012 und Senin und Hamid 2016 weisen die Eignung von GPR zur Bestimmung von Feuchte und Salzgehalt im Mauerwerk nach. Das GPR-Messungen auch an inhomogenem Mauerwerk sinnvoll möglich sind, zeigt unter anderem eine Studie von Wai-Lok Lai et al. 2014 oder eine Studie an Ziegeln von Agliata et al. 2018.

In einer neueren Studie von Xiao et al. 2018 wird gezeigt, dass auch in historischem Baumaterial wie Kalkstein eine ortsauflösende Messung der Feuchteverteilung möglich ist (Messbereich: 0,1-2 GHz). Die Autoren weisen dabei aber auch auf die Frequenzabhängigkeit hin und erwähnen, dass die Art der Datenauswertung zentral für den Einsatz dieses Messverfahrens im Bauwesen ist.

Eine weitere aktuelle Studie an Kalkstein aus dem Jahr 2021 zeigt, dass insbesondere die Kombination aus GPR-Multifrequenzmessung und KI-Methoden vielversprechend ist (Guilbert et al. 2021).

Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Dass es auf dem Gebiet der orts aufgelösten Feuchte- und Salzmessung in (historischem) Mauerwerk insbesondere bei den elektromagnetischen Messverfahren aber weiterhin noch starken Forschungsbedarf gibt, zeigen die z.T. bereits weiter oben im Text erwähnten neueren Studien oder aber auch die Studien von Hoła and Sadowski 2019. Grund dafür ist die große Menge an Parametern, welche die gewonnenen Messdaten beeinflussen können. Zu den Einflussfaktoren gehören neben Feuchte und Salz auch die Zusammensetzung des (historischen) Mauerwerks oder die Konstruktion.

Wie im Stand der Technik aufgezeigt, existiert kein zerstörungsfreies Messverfahren, das ein qualitativ hochwertiges und reproduzierbares Messergebnis zur orts aufgelösten Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes ermöglicht. Die dielektrischen Messverfahren sind zur Erfüllung dieser Messaufgabe am geeignetsten. In der Literatur wird aufgezeigt, dass im GHz-Frequenz-Bereich der Salzgehalt als auch der

Feuchtegehalt unterschiedlich auf die Einkopplung elektromagnetischer Wellen reagiert. Über eine Einzelfrequenzmessung kann jedoch die Vielzahl an gewünschten Messergebnissen (Feuchtebelastung, Salzbelastung, Salzart) nicht detektiert werden. Bei vielen der wissenschaftlichen Arbeiten zu dielektrischen Verfahren wird bei nur einer festen Frequenz gemessen, weshalb es nicht möglich ist, aus den bei einer Frequenz gewonnen Messinformationen auf alle relevanten, die Permittivität beeinflussenden Größen zu schließen. Zudem wurden noch zu wenig Messungen an realen Bauwerken und insbesondere an historischen Gebäuden durchgeführt, so dass die Übertragbarkeit der Methode auf die gängige Baupraxis bisher nicht gegeben ist.

Der im Forschungsvorhaben verfolgte Ansatz erfordert eine Vielzahl an Messungen in einem breitbandigen Frequenzbereich, um eine hohe Datenbasis bezüglich des Einflusses von Feuchtigkeit und Salzen auf das Signalverhalten der breitbandigen Radarwelle zu erlangen. Durch Einsatz von Machine Learning Methoden sollen aus den Daten die relevanten Eigenschaften extrahiert und so eine salzunabhängige Feuchtigkeitsmessung realisiert werden. Insbesondere der Einsatz von Neuronalen Netzen bei der Verarbeitung der Daten wurde in diesem Zusammenhang noch nicht untersucht. Zudem wurde in noch keiner der vorliegenden wissenschaftlichen Studien überprüft, wie verschiedene Salzarten aufgrund ihrer Unterschiede in ihrer Ionengröße den Imaginärteil der Permittivität beeinflussen und ob eine messtechnische Unterscheidung der Salzarten möglich ist. Durch das hier vorgestellte Forschungsprojekt soll auf eine auf Reflektometrie basierte Messsystematik und eine optimierte KI-basierte Datenauswertung für unterschiedliche Mauerwerkstypen entwickelt werden. Diese Multifrequenzmessung wird durch die neuen Möglichkeiten aber auch Verfügbarkeiten der Sensoren realistischer und vor allem handhabbarer, so dass in Zukunft nach dieser grundlegenden Analyse und Entwicklung dieses Messverfahrens auch eine praktikable Anwendung in der Baupraxis realistisch erscheint.

Zielstellung

Konkrete Projektziele

Ziel des Projekts ist eine nichtinvasive, großflächig anwendbare und einfache bzw. schnelle Feuchtemessung an historischen Mauerwerken, unabhängig von der vorherrschenden Salzbelastung. Dabei soll eine Eindringtiefe bzw. Messtiefe von etwa 50cm erreicht werden. Die Charakterisierung von historischem Mauerwerk erfolgt dabei über eine zeitaufgelöste Reflektometrie mittels elektromagnetischer Wellen unterschiedlicher Frequenzen. Die Untersuchungen bauen darauf auf, dass sich oberhalb einer Frequenz von 100-200 MHz der Effekt von Salz und Feuchte auf die komplexe Dielektrizitätskonstante auftrennen und so messtechnisch separiert werden können.

Hintergrund dabei ist, Feuchteschäden besser zu verstehen und im Kontext der Sanierung historischer Gebäude die Ursachen richtig und nachhaltig zu begegnen.

Ein weiteres Ziel ist es, gelöste Salze in der Feuchtebelastung detektieren zu können und sie gegebenenfalls zu quantifizieren. Somit kann das Schadenspotential bei einer Abtrocknung im Vorfeld schon grob abgeschätzt und bewertet werden. Neben einer Unterscheidung zwischen dem Einfluss von Feuchte auf die Dielektrizitätskonstante (Einfluss im Wesentlichen auf den Realteil) und dem Einfluss von Salz auf die Dielektrizitätskonstante (Einfluss im Wesentlichen auf den Imaginärteil) soll außerdem untersucht werden, wie sich unterschiedliche Salzarten (Ionen Größen) auf den Imaginärteil auswirken. Hintergrund ist, dass nicht alle Salzarten den gleichen Umfang an Schäden am Bauwerk hervorrufen und eine etwaige Bestimmung des vorliegenden Salztyps eine Bewertung des Schadens- und Gefahrenpotentials ermöglichen könnte.

Forschungsdesign

In dem Forschungsprojekt wurde der Frage nachgegangen, ob der Informationsgewinn im Hinblick auf die Interpretation der rückreflektierten Radarwellen hinsichtlich Feuchtigkeit und Salzgehalt im Mauerwerk vergrößert werden kann, wenn eine breitbandige Radarquelle verwendet wird im Vergleich zu Radarquellen bei fixen Frequenzen. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob durch die Auswertung der breitbandigen Signale die Mauerwerke ausreichend charakterisiert werden können. Um die Interpretation der zurückreflektierten Radarwellen zu vereinfachen und zu verbessern, wurden KI-basierte Auswerteprogramme hergenommen und neuronale Netze über supervised learning Methoden antrainiert. Des Weiteren soll der ab einer bestimmten Frequenz zunehmend auftretende Unterschied im Imaginärteil in Abhängigkeit von der Salzkonzentration erneut überprüft und die Auswertung, selbst bei schlechten Signalen verbessert werden.

Arbeitshypothesen

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll die Eignung eines Multifrequenzansatzes mit elektromagnetischen Messverfahren zur nichtinvasiven Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes an historischen Mauerwerksverbänden untersucht werden. Erreicht werden soll dies durch Messungen im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 10 GHz und über einzelne sowie kombinierte Auswertungen des frequenzabhängigen Real- und Imaginärteils der Permittivität über Machine-Learning Algorithmen. Im Forschungsvorhaben soll über die zeitaufgelöste Reflektometrie nicht-invasiv mit nur einseitigem Wandzugang elektromagnetische Wellen in das Mauerwerk eingekoppelt und nach Reflexion an der gegenüberliegenden Wandseite der Real- und Imaginärteil bei unterschiedlichen Frequenzen gemessen und analysiert werden (siehe Abbildung 3). Hierbei liegt die Herausforderung in der unterschiedlichen Materialzusammensetzung von Mauerwerken, den unterschiedlichen Feuchte- und Salzgehalten sowie Salzarten.

Eine unterschiedliche Materialität im Mauerwerk könnte auch eine Chance sein. Handelt es sich zum Beispiel um ein mehrschaliges Mauerwerk bzw. befinden sich im Mauerwerksquerschnitt Materialübergänge kann über das reflektierte Signal an diesen Grenzen theoretisch eine tiefenabhängige Messung des Feuchtegehaltes erfolgen (siehe Abbildung 3 rechte Darstellung). Vorausgesetzt, die reflektierten Messsignale an den unterschiedlichen Materialgrenzen sind deutlich trennbar, verwertbar und folglich auch einzeln auswertbar. Eine freie und individuelle Festlegung von einzelnen Tiefenstufen ist mit dem Messsystem jedoch nicht möglich.

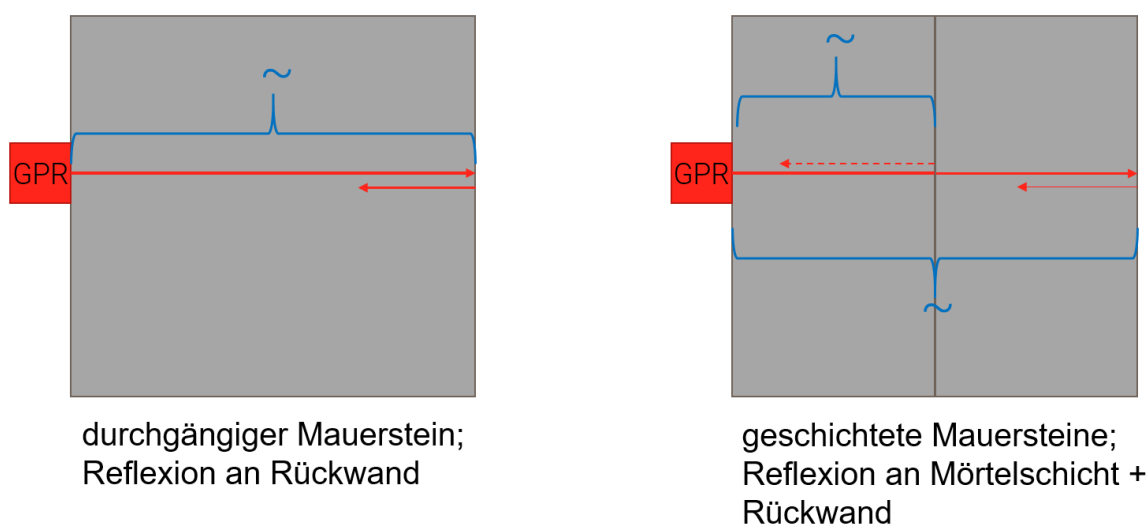


Abbildung 3: Schematisch dargestelltes Messkonzept. Bei einem durchgängig homogenen Medium (im linken Bild) ist nur eine Aussage über die integrale Wegstrecke möglich. Handelt es sich zum Beispiel um ein geschichtetes Mauerwerk, mit einer dazwischenliegenden

Mörtelschicht, die eine Materialgrenze darstellt, könnten über die Reflexionen an den einzelnen Grenzschichten tiefenabgestufte Informationen gewonnen werden.

Methodischer Ansatz

Es werden verschiedene Labortests bzw. Messungen an bauwerkstypischen Mauerwerksmodellen mit verschiedenen Feuchte- und Salzkonzentrationen, Feuchte- und Salzprofilen sowie unterschiedlichen Salzarten über ein breites Frequenzband durchgeführt. Die zu erstellenden Mauerwerksprüfkörper sollen dabei im Hinblick auf verwendete Baustoffe, historischen Vorgaben entsprechen und in ihren Dimensionen ausreichend Platz für Messungen bieten. Gleichzeitig sollen sie aber noch mobil und transportfähig sein.

Begleitend werden mit Hilfe des hygrothermischen Simulationsprogramm Delphin bereits im Vorfeld Berechnungen für die Mauerwerksprüfkörper durchgeführt, um die Zeiträume der Wässerungs- und Trocknungsphasen besser definieren und den engen Zeitplan des Projekts einhalten zu können. Das setzt voraus, dass die verwendeten Materialien bereits ausreichend vermessen wurden und zum Beispiel bereits in der integrierten Materialdatenbank von Delphin aufgelistet sind.

Vor und auch parallel zu den Radarmessungen an den Mauerwerkstestkörpern wurde an repräsentativen, kleinen Testkörpern und Einzelsteinen der Trocknungsverlauf gemessen. Konkret sollen einzelne Sandsteinblöcke und Ziegelsteine bis zur Sättigungsfeuchte (unter Atmosphärendruck) in einem Wasserbad entweder mit deionisiertem Wasser oder einer Salzlösung gewässert und anschließend an der Luft getrocknet werden. In regelmäßigen Abständen erfolgen Radarmessungen an besagten Probekörpern unter Beobachtung des Restwasseranteils in den Proben durch begleitendes Wiegen. Die durch die Radarmessungen aufgenommenen und durch nachgeschaltete Auswertung ermittelten frequenzabhängigen Kurvenverläufen zum Real- und Imaginärteil der Permittivität soll dadurch ein definierter Wert der Entnahmefeuchte in Masseprozent, bezogen auf das Trockengewicht des Probekörpers, zugewiesen werden. Durch Anpassen von Modellkurven an diese Kurvenverläufe sollen Parameter gefunden werden, welche die Charakteristika der Frequenzkurven repräsentieren und sich mit den Feuchtigkeitswerten verknüpfen lassen.

Als zerstörungsfrei arbeitende Messgeräte zur Messung der dielektrischen Eigenschaften des Mauerwerks soll im geplanten Vorhaben ein kommerziell verfügbares Radarmodul eingesetzt werden, die im Bauingenieurwesen bereits standardmäßig zur Lokalisierung von Bewehrungselementen oder Materialübergängen genutzt werden. Der Realteil wird dabei analog zu den durch Laufzeitanalyse der reflektierten Radarwellen bestimmt, während der Imaginärteil aus der Analyse der reflektierten Radaramplitude abgeleitet wird (Krause et al. 2007). Typischerweise werden für diese Untersuchungen kommerzielle Georadargeräte mit Frequenzen zwischen 200 MHz und 2,45 GHz eingesetzt (Maierhofer 2003, Maierhofer und Leopold 2001). Ferner sind die hinterlegten Auswerteroutinen nicht darauf optimiert, aus den Daten der A-Scans, B-Scans und den daraus abgeleiteten C-Scans (siehe Abbildung 4) quantitative Aussagen zum Feuchte- und Salzgehalt und deren räumlicher Verteilung zu liefern.

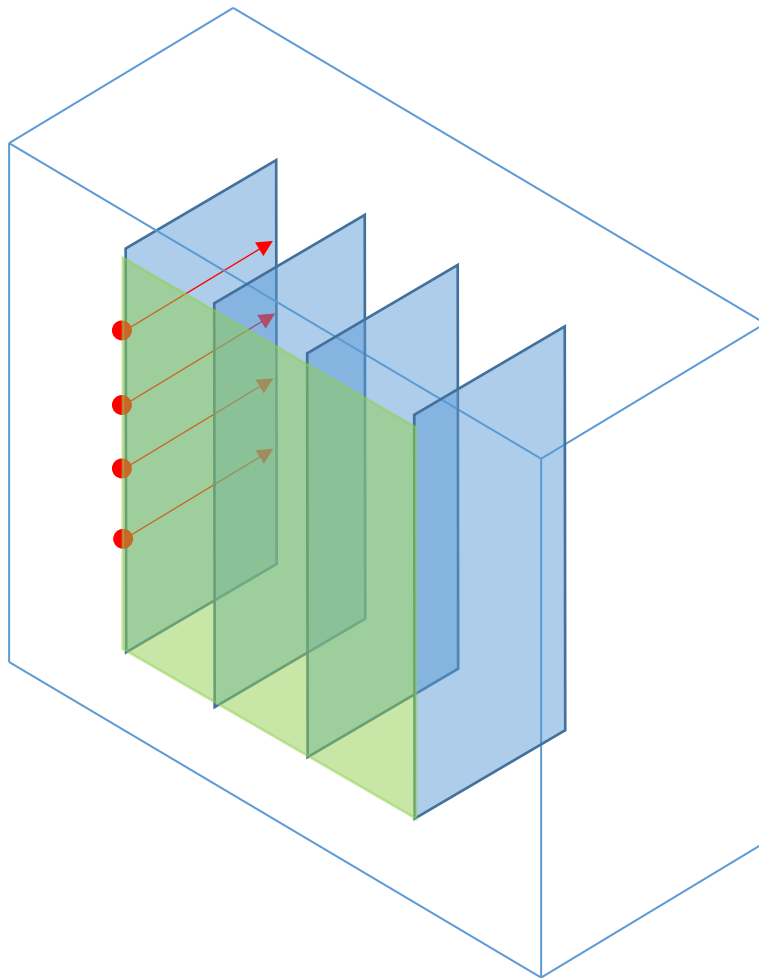


Abbildung 4: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Scanarten: A-Scan = Punktmessung (rote Pfeile); B-Scan = aus mehreren hintereinanderliegenden A-Scans (blaue Flächen) > Linienmessung, C-Scan = mehrere hintereinanderliegende Linienmessungen > Flächenmessung (grüne Fläche)

Im geplanten Vorhaben sollen das am Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT) entwickelte Datenauswerteverfahren aus der Akustik auf die Auswertung von Radardaten übertragen und geeignete Simulationsmodelle entwickelt werden. Die Simulationsmodelle sollen helfen, eine geeignete Multifrequenzkombination zur ortsabhängigen Messung des Salz- und Feuchtegehalts in historischem Mauerwerk zu identifizieren. Messungen an repräsentativen Einzelsteinen (wie oben beschrieben) sollen dazu dienen, das Simulationsmodell zu validieren und einen geeigneten Machine Learning basierten Ansatz zur Auswertung der Messdaten zu entwickeln. Über supervised learning und neuronale Netze würde eine KI-basierte, teilsautomatisierte Auswerteroutine zur Verfügung stehen.

Nach einer Etablierung der Modelle im Laborversuch sollen finale Tests im Feld an realen Bauteilen erfolgen. Dabei soll die entwickelte Messtechnik validiert und gleichzeitig die Praktikabilität des Systems in der Praxis getestet werden. Sowohl bei den Laborversuchen als auch bei den Feldtests werden die aus den Messdaten abgeleiteten Werte für Feuchte-, Salzgehalt und Salzart mit den aus der bereits etablierten Darr-Methode gewonnenen Referenzdaten verglichen.

Arbeitspakete und allgemeiner Projektablauf

Das Projekt ist in insgesamt zwölf Arbeitspakete unterteilt. Dabei wurden gewisse Pakete oft auch parallel bearbeitet und spätere Arbeitspakete zum Teil vorgezogen (siehe Abbildung 5).

1. **AP 1:** Design of Experiments (DoE): Festlegung Spezifikationen/Anforderungen an die herzustellenden Mauerwerksproben und die Messtechnik und Beschaffung der Komponenten

2. **AP 2:** Entwicklung eines FEM-Simulationsmodells zur Beschreibung der Experimente: Nutzung des im ISAT vorhandenen Simulationsprogramms COMSOL und Anpassung bereits vorhandener Modelle zur Simulation des Ausbreitungsverhaltens akustischer Wellen in Festkörpern auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen
3. **AP 3:** (parallel zu AP2): Entwicklung und Bau eines Mauerwerksprüfstandes zur systematischen Kontaminierung von Mauerwerksverbänden hinsichtlich des Feuchte- und Salzgehaltes zur Gewinnung reproduzierbarer Messergebnisse.
4. **AP 4:** Konstruktion und Aufbau eines Laborprüfstands zur definierten Vermessung der in AP 3 hergestellten Mauerwerksproben; Integration der Radarmodule und der Datenaufnahmeeinheit (Oszilloskop, PXI) in den Prüfstand; Inbetriebnahme und Überprüfung der Funktionalität des Prüfstandes an trockener definierter Testprobe (z.B. Sandsteinblock); Bewertung Signalgüte und Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Frequenz
5. **AP 5:** Vermessung der in AP 1 festgelegten Testmatrix: Materialproben aus unterschiedlichem Mauerwerk, unterschiedlicher Feuchte- und Salzbelastung sowie Salzart
6. **AP 6:** parallel zu AP 5: Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes im Mauerwerk mit Referenzmethoden (Gravimetrie) und Abgleich der Referenzmessdaten mit den in AP 5 gewonnenen Ergebnissen
7. **AP 7:** Anpassung des Simulationsmodells auf Basis der gewonnenen Messdaten, ggf. Optimierung der Messroutine durch z.B. Änderung der Anregeparameter, z.B. des Anregemusters (codierte Anregung, Bestimmung der Einhüllenden etc.) oder Anpassung der Anregfrequenz
8. **AP 8:** Weiterentwicklung des Auswertalgorithmus mittel machine learning methoden, z.B. durch feature engineering (zeitaufgelöste Darstellung der Frequenzverteilung der Empfangssignale und anschließende Hauptkomponentenanalyse)
9. **AP 9:** 2-dimensionaler Scan (= Aufnahme von Messdaten an mehreren Messpunkten bei den unterschiedlichen Mauerwerken) der Mauerwerksproben aus AP 3 zur Erstellung von B- und C-Scan zur orts aufgelösten Analyse der Feuchte-/Salzbelastung, Auswertung der Messdaten mittels in AP 8 entwickelten machine-learning Algorithmus, Abgleich der Messergebnisse mit Referenzmessungen (gravimetrisch). Ziel ist es, durch Auswertung der Messdaten an unterschiedlichen Messpunkten eine dreidimensionale Feuchte- und Salzverteilung zu visualisieren.
10. **AP 10:** Optimierung des Algorithmus auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 8 und 9 und erneute Datenanalyse (Analyse bereits vorhandener Messdaten) mithilfe des angepassten Algorithmus und Bewertung der mit dem Algorithmus erzielten Ergebnisse
11. **AP 11:** Messungen an ausgewählten realen historischen Mauerwerken und Abgleich mit über Referenzmessungen gewonnenen Daten
12. **AP 12:** Dokumentation und Bewertung des Messverfahrens für die Baupraxis

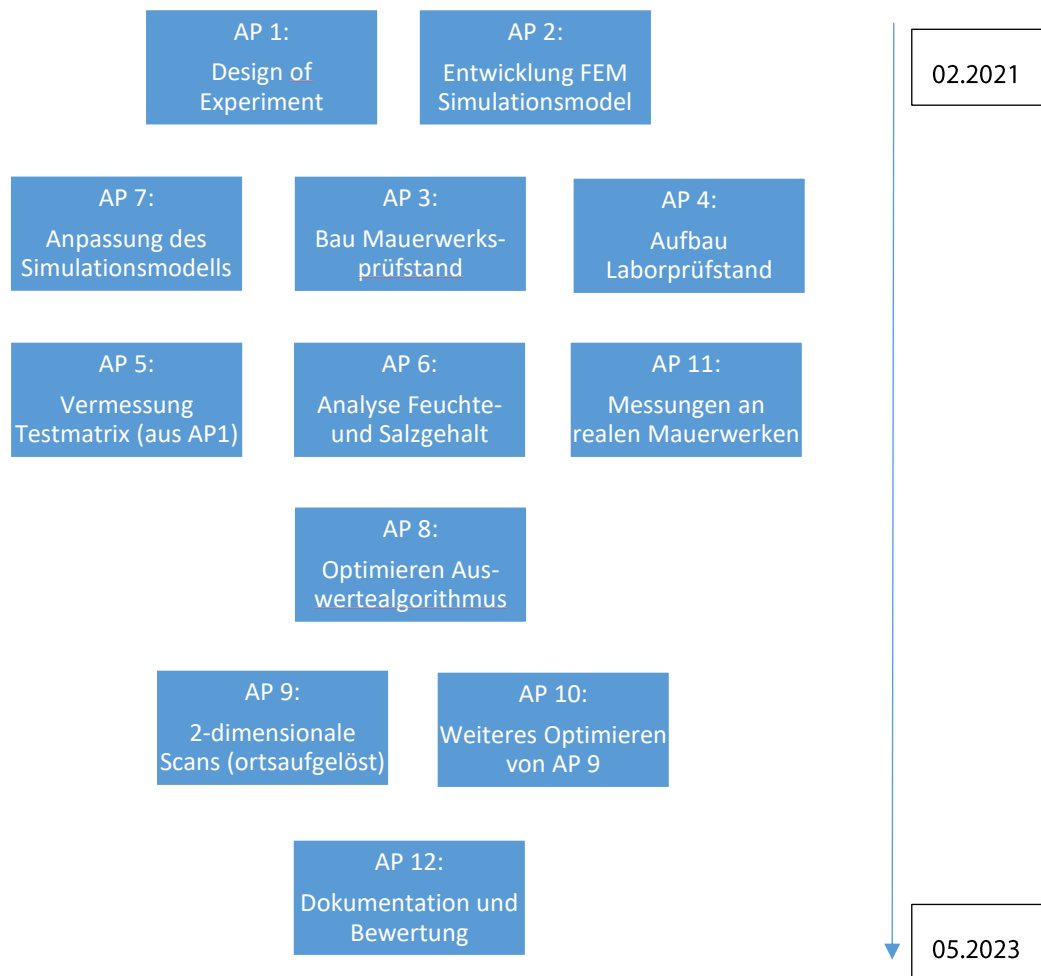


Abbildung 5: Überblick über die Bearbeitung aller Arbeitspakete über den kompletten Projektverlauf.

Grundlegende Vorüberlegungen

Recherche und Beschaffung eines kommerziellen Radarmoduls

Im Vorfeld wurde eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt, um den möglichen Frequenzbereich der Radarmodule einzuschränken.

Leschnik 1999 berichtet, dass gelöste Salze den Real- und Imaginärteil der Permittivitätszahl in gleicher Weise verändern wie die Feuchte. Eine Trennung ist nur bei bekannter Feuchte bzw. Salzgehalt möglich. Diese Aussage wurde für Frequenzen kleiner 100 MHz getroffen. Erst darüber spaltet sich der Einfluss von Feuchte und Salzgehalt in der Dielektrizitätszahl auf.

Über einer Frequenz von 2 GHz haben die Salze keinen Einfluss auf den Realteil der Dielektrizitätszahl, während dieser im Imaginärteil noch zu sehen ist. Im höherfrequenten Bereich (8.5 – 12.3 GHz) ist der Einfluss von Salzen vernachlässigbar, wohingegen eine hohe Feuchteempfindlichkeit besteht. Dies geht jedoch zu Kosten der Signalqualität, da aufgrund geringerer Wellenlängen die einhergehende Streuung der Radarwellen an Materialübergängen sowie Materialkörnern zunimmt (Leschnik 1999).

Unter diesen Gesichtspunkten (Einfluss Feuchte/Salz, Streuung, Wellenlänge) sind Messungen im niederfrequenten Radarbereich (**< 1.5 GHz**) zur Bestimmung des Salzgehalts notwendig. Ebenso sind Messungen im höherfrequenten Bereich (**> 2 GHz**) zielführend für die Bestimmung der Feuchte unabhängig vom Salzgehalt. Die Feuchte lässt sich mit steigender Frequenz mit steigender Empfindlichkeit bestimmen, jedoch nimmt die Signalstärke der Rückreflexion aufgrund der Absorption und Streuung stark ab.

Um schon im Vorfeld den optimalen Frequenzbereich besser einschränken und das Verhalten von breitbandigen Radarwellen in einem Medium besser vorhersagen zu können, wurden verschiedene Situationen mit Hilfe von einer Simulationssoftware berechnet.

Recherche zu bisherigen analytischen Auswerteverfahren zur Feuchtigkeitsbestimmung

Seitens Publikationen wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um auf die Feuchtigkeit eines Baustoff-Wasser-Verbundes zu schließen.

Frühe analytische Materialmodelle beruhen grundsätzlich auf der Auswertung des Realteils der Dielektrizitätszahl des Wasser-Baustoff(-Luft)-Gemisches (Sihvola 2000).

Da Wasser unterhalb einer Frequenz von 1 GHz eine Dielektrizitätszahl von circa 80 aufweist und die meisten Baustoffe in diesem Bereich lediglich eine Permittivität von 3-7 aufweisen, lässt sich über den volumenbezogenen Wasseranteil eine Skalierung ableiten. (Leschnik 1999)

Die auf dieser Grundlage erstellten Materialmodelle liegen in verschiedenen Komplexitätsstufen vor. Ein triviales, aber häufig angewandtes Modell ist das Complex-Refractive-Index-Modell (CRIM) nach Gleichung (2). Hierbei wird die effektive Dielektrizitätszahl ε_e aus den Einzelpermittivitäten ε_w und ε_m der Komponenten des Wasser-Baustoff-Verbundes entsprechend ihrer Volumenanteile v gewichtet. (Sihvola 2000)

$$\varepsilon_e^{\frac{1}{3}} = v \varepsilon_w^{\frac{1}{3}} + (1 - v) \varepsilon_m^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Repräsentativ für die Klasse an erweiterten Materialmodellen sei das Modell nach Polder-Van Santen aufgeführt (siehe Gleichung (3)). Hierbei gehen neben der Gewichtung der Dielektrizitätszahl mit den entsprechenden Volumenanteilen der Verbundstoffe auch die Formgebung des in der Baustoff-Matrix eingeschlossenen „freien“ Wassers mit ein. (Jones und Friedman 2000)

$$\varepsilon_e = \varepsilon_m + \left\{ \left[\sum_{j=x,y,z} \frac{v(\varepsilon_w - \varepsilon_m) [\varepsilon_w + (1 - N_j)(\varepsilon_e - \varepsilon_m)]}{3 [\varepsilon_m + (1 - N_j)(\varepsilon_e - \varepsilon_m) + N_j(\varepsilon_w - \varepsilon_m)]} \right] * \left[1 - \sum_{j=x,y,z} \frac{v N_j (\varepsilon_w - \varepsilon_m)}{3 [\varepsilon_m + (1 - N_j)(\varepsilon_e - \varepsilon_m) + N_j(\varepsilon_w - \varepsilon_m)]} \right]^{-1} \right\} \quad (3)$$

Generell ist bei diesem Typ an Materialmodell der Einfluss der Frequenz nicht abgebildet. Der Umstand, dass auch der Imaginärteil der Permittivität nicht ausgewertet wird, erklärt die Einschränkungen, welche diese Materialmodelle mit sich bringen.

Alternativ hierzu stehen eine aktuellere Klasse an Materialmodellen welche die relative Permittivität nicht nur im Komplexen, sondern auch frequenzabhängig beschreiben.

Für den Frequenzbereich von 100 MHz bis 1 GHz wurde seitens Publikationen (Bourdi et al. 2008; Ihamouten et al. 2011) das Jonscher-Modell verwendet. Hierbei wird die frequenzabhängige, effektive Permittivität $\varepsilon_e(\omega)$ des Wasser-Baustoff-Verbundes durch einen Satz an Parametern gemäß Gleichung (4) definiert.

$$\varepsilon_e(\omega) = \varepsilon_0 \chi_r \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^{n-1} \left[1 - i \cot \left(\frac{n\pi}{2} \right) \right] + \varepsilon_\infty = \varepsilon'_e - i \varepsilon''_e \quad (4)$$

In der Praxis werden die drei unbekannten Parameter χ_r (komplexe elektrische Empfindlichkeit), ε_∞ (Realteil der Permittivität bei Frequenzen gegen Unendlich) und n (empirischer Dämpfungswert) durch verschiedene Fitting-Techniken an die Messkurven ermittelt (siehe Abbildung 6). Durch Klassifizierung der Jonscher-Parameter mit bekannten Feuchtigkeitswerten von Versuchsreihen kann schlussendlich eine Aussage über den Feuchtigkeitsgehalt des Messobjektes getroffen werden.

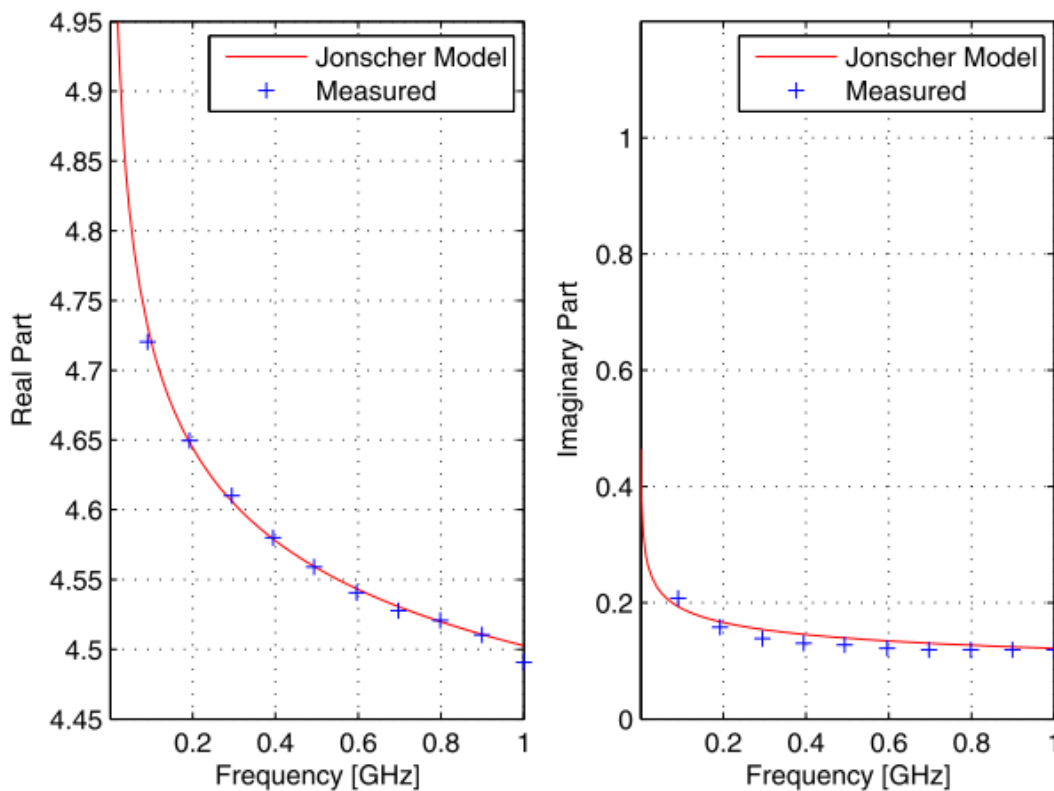


Abbildung 6: An Messdaten gefittetes Jonscher 3-Parameter-Modell (Bourdi et al. 2008)

Für den in dieser Forschungsarbeit favorisierten Frequenzbereich existieren zum aktuellen Zeitpunkt noch keine etablierten Materialmodelle. Eine zukünftige Herausforderung wird darin bestehen, anhand der

aufgenommenen Messergebnisse ein Modell zu erstellen, welches die Steigungen und Absolutwerte der Permittivitätsverläufe im Frequenzbereich in Relation zum Wasser- und Salzgehalt der Probekörper widerspiegelt.

Ein zweistufiger Ansatz soll hierbei verfolgt werden. Zuerst werden durch manuelles Anpassen von Modellkurven an die aufgenommenen Frequenzverläufe Parameter bestimmt. Diese werden nachfolgend auf die Tauglichkeit geprüft, salzunabhängige Feuchtigkeitsergebnisse zu ermöglichen. Im zweiten Schritt soll das manuelle Anpassen von Modellkurven durch ein Neuronales Netz übernommen werden, um eine höhere Anzahl an Features (Parametern) zu erfassen, sowie die Nutzerinteraktion zu vereinfachen. Ein vielversprechender Ansatz ist insbesondere der Einsatz von Faltungsnetzen, da sich diese bereits für die Verarbeitung von Zeitreihen als vorteilhaft erwiesen haben und die in diesem Vorhaben auftretenden Frequenzreihen in ihrer Art der Daten als ähnlich beschaffen angesehen werden.

Entwicklung eines Simulationsmodells zur Beschreibung der Experimente

Für die Simulation der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem definierten Medium bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Der hier verfolgte Ansatz beruht auf der Betrachtung eines initialen Signals, welches über einen definierten Weg propagiert und eine frequenzabhängige Dämpfung erfährt. Konkret wird das Ausgangssignal zunächst mittels einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Hier wird die Phase des Signals verschoben, was einer Ausbreitung über die Laufstrecke entspricht und zusätzlich die Amplitude gedämpft. Im finalen Schritt wird das modifizierte Ausgangssignal über eine inverse Fourier-Transformation zurück in den Zeitbereich transformiert und stellt das propagierte Signal dar. Durch einen Reflexionskoeffizienten gemäß dem Unterschied der Brechungsindizes am Übergang zwischen zwei Materialien werden unterschiedlich starke (Rück-)Wandreflexionen berücksichtigt. Auf diese Weise können auch Streureflectionen an Inhomogenitäten abgebildet werden. Der Zweck liegt hier in der Erstellung eines möglichst realistischen, von Rauschen betroffenen, Signals.

Ziele der Simulation:

Mit Hilfe des Simulationsmodells sollen Aussagen über das Signalverhalten eines Radarpulses in einem bekannten Medium getroffen werden. Die weiterführende Zielsetzung liegt darin, einen Frequenzbereich auszumachen, bei welchem zu vorgegebener Eindringtiefe (~ 50 cm), ein auswertbares, reflektiertes Signal zu erwarten ist. Mit dieser Erkenntnis und dem Wissen über die dispersiven Eigenschaften von Radarwellen in freiem Wasser und Salzen in Baustoff-Verbänden kann ein geeignetes Frequenzspektrum erfasst werden, um schlussendlich die erfolgversprechendsten Rahmenbedingungen für eine selektive Wasser- und Salzmessung zu schaffen.

Weiterhin kann durch gezielte Einbringung von Streueffekten, welche analog zu den Rückreflektionen an Inhomogenitäten stehen, ein möglichst realistisches Signalverhalten erzeugt werden. Es liegt daher nahe, erste Auswerteroutinen basierend auf den Simulationsdaten zu erstellen. Die so ermittelten Frequenzverläufe für den Real- wie auch Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätszahl können wiederum mit denen ins Simulationsmodell eingegebenen Referenzkurven aus der Literatur abgeglichen werden.

Umsetzung:

Da eine elektromagnetische Welle in einem Medium in der Regel dispersiv ist, müssen entsprechende Materialdaten in die Simulation eingegeben werden. Für einen ersten Ansatz dienten daher die Frequenzkurven von Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl von **Beton**, da dieser moderne Baustoff in der Literatur umfassend untersucht ist und entsprechende Daten über einen breiten Frequenzbereich vorliegen. Später können, über zugrundeliegende Messungen vorausgesetzt, auch Referenzkurven für andere Materialien als Input dienen. Entsprechende Referenzkurven können den Abbildungen in Abbildung 7 entnommen werden (Mouhasseb 2007).

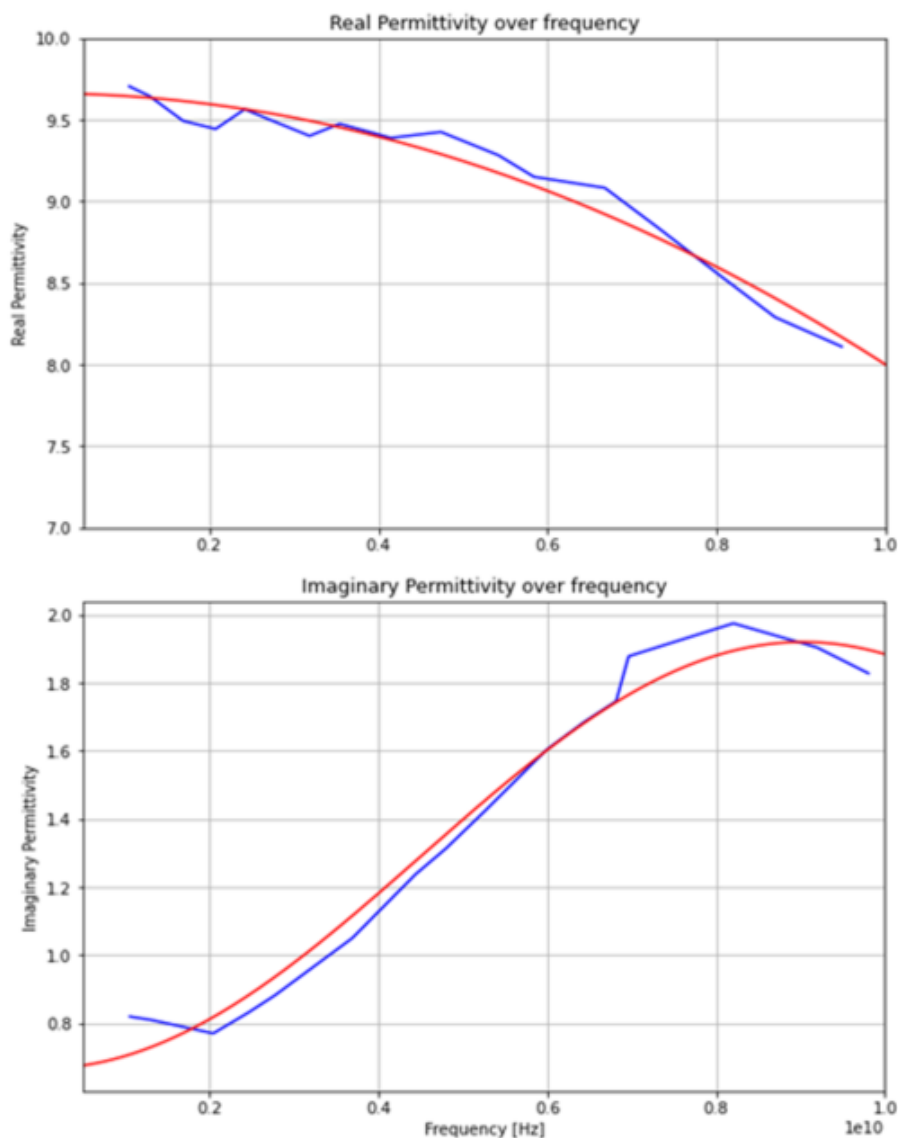


Abbildung 7: Dispersionsverlauf der komplexen Permittivität von Beton. Blau: Messdaten aus Mouhasseb 2007; Rot: Gefittete Werte als Eingangsgröße für das Simulationsmodell.

Mit Kenntnis der dispersiven Eigenschaften der Permittivität kann wiederum die eigentliche Wellenausbreitung simuliert werden. Durch die weiter unten im Kapitel „Verarbeitung der Radardaten“ beschriebenen Zusammenhänge (Kramers-Kronig, Brechungsindex, Dämpfung) kann aus den Verläufen von Realteil- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl die Phasengeschwindigkeit und das Amplitudenverhältnis der elektromagnetischen Welle berechnet werden.

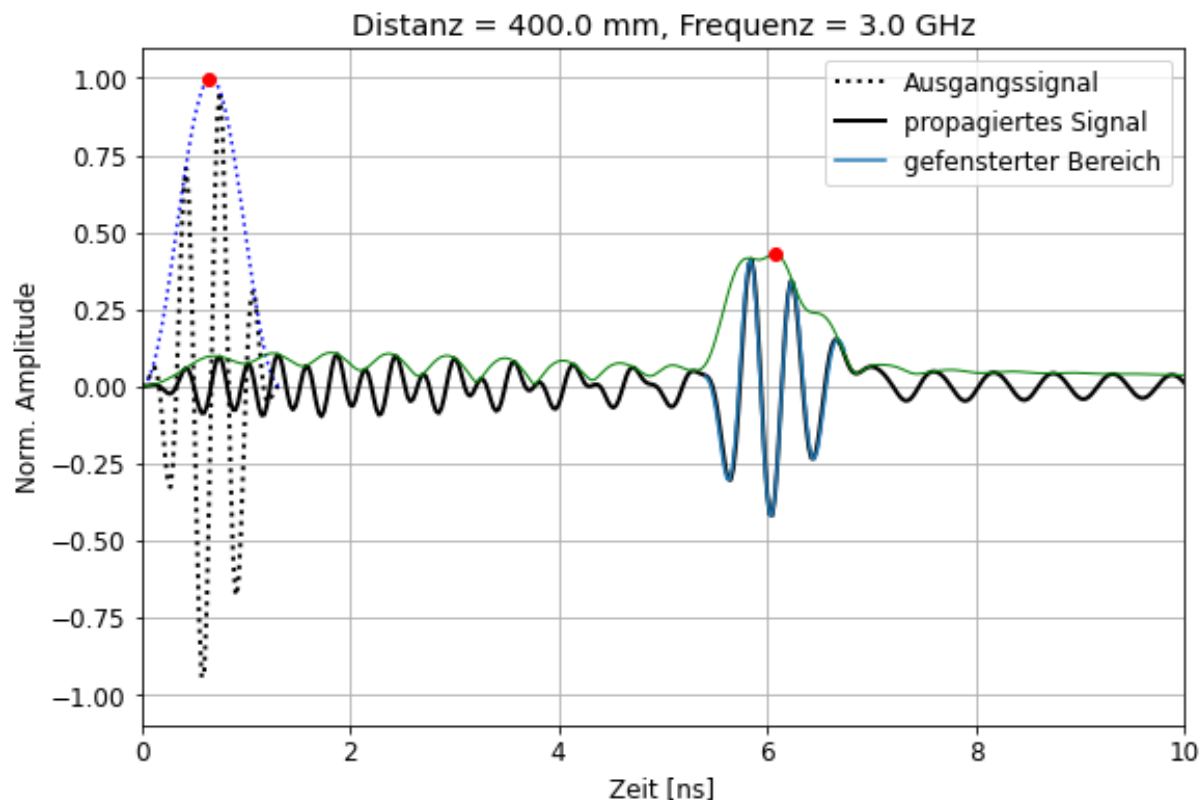


Abbildung 8: Simulierte dispersive Wellenausbreitung mit Streureflexionen. Die roten Punkte sind die Maxima der Einhüllenden. Der blau eingefärbte Kurvenbereich entspricht dem gefensterten Signal.

Letztendlich bestimmt die Phasengeschwindigkeit die Laufzeit eines mit definierter Laufstrecke propagierten Signals. Die Dämpfung (durch den Absorptionskoeffizienten) liefert die Information über den Abfall der Amplitude über die Distanz. In Abbildung 8 ist eine entsprechende Propagation eines Ausgangssignals (gepunktet, schwarz) hin zu einem reflektierten, rückkommenden Signal (durchgehend, schwarz) mit überlagertem Streufeld dargestellt.

Anhand solcher Verläufe kann eine Rückgewinnung der Eingabeparameter (komplexe Dielektrizitätszahl) erfolgen. Hierzu wurde eine Auswerteroutine genutzt, welche im ersten Zugang eine Einhüllende über den Datensatz zieht und das lokale Maxima der Hauptreflexion erfasst. Über eine Abschätzung der Signalbreite wird um den Bereich des ermittelten Maximums eine Fensterfunktion (zum Beispiel Hanning-Fenster) aufgebracht. Durch Multiplikation mit einer Fensterfunktion, welche im Bereich des relevanten Signalanteils größer Null und außerhalb dessen gleich Null ist, kann die Rückreflexion aus dem Gesamtsignal isoliert werden. In Abbildung 8 ist dieses ebenfalls auch automatisierbare Vorgehen graphisch dargestellt, wobei in blau der Bereich des Signals markiert ist, bei welchem die Fensterfunktion größer Null beträgt.

Der Zweck der Isolierung und Fensterung des rücklaufenden Signals liegt in der weiteren Signalverarbeitung. Dies wird im späteren Kapitel „Verarbeitung der Radardaten“ genauer erklärt.

Radarsonden und erste Probemessungen an Testkörpern

Im Zuge einer Gerätevorführung des Herstellers Proceq konnten mittels des Radarmoduls GP8800 erste Testmessung an Einzelsteinen und bereits vorhandenen kleineren Testkörpern durchgeführt werden (Abbildung 9). Über diese ersten Testmessungen konnten bereits wesentliche Erkenntnisse für die Einsetzbarkeit der Messmethode für die im Projekt definierte wissenschaftliche Fragestellung gewonnen werden. Zudem stand noch ein weiteres kleineres Radargerät mit dem LT102 von Aria Sensing zur Verfügung.



Foto: Oliver Blaschke

Abbildung 9: Testmessung mit dem Radarmodul GP8800 von Proceq bei einer Produktvorführung. Mauerwerkstestkörper mit nach oben hin abnehmenden Feuchtigkeitsgradienten.

Proceq, GP8800:

Bei dem Radarmodul GP8800 des Herstellers Screening Eagle handelt es sich um ein Dauerstrich-Radargerät. Nach Herstellerangaben operiert das Gerät in einem Frequenzbereich von 0,4 bis 6 GHz. Als üblicher Einsatzzweck wird die Bewehrungsdetektion in Beton bis zu einer Tiefe von 60 cm angegeben. Durch die hohen Dämpfungseigenschaften von Beton wird eine ähnlich gute Performanz des Messgerätes auch bei Mauerwerken mit Wasser- und Salzeintrag angenommen. Aufgrund einer Erprobung des Messgerätes an vorbereiteten Testkörpern konnte eine für den weiteren Projektverlauf vorläufig entwickelte Methodik zur Bestimmung der Permittivität auf Realdaten erprobt werden. Neben der Untersuchung der Signalqualität stand bei der Produktvorführung auch die Überprüfung von Hypothesen zur Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Messmethodik im Fokus.

Gemäß der Abbildung 9 wurden mit verschiedenen Feuchtegraden versetzte Mauerwerks-Verbände untersucht. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die gemäß einer ersten Auswertung generierten Frequenzverläufe des Real- und Imaginärteils der Dielektrizitätszahl. Die Messungen hierfür erfolgten in der Mitte des Probekörpers, vertikal von der Unterkante bis zur Oberkante.

Anhand Abbildung 10 wird ersichtlich, dass die Messungen zum Realteil der Permittivität in erster Linie durch den Absolutwert gekennzeichnet sind. Eine klare Trennung zwischen der feuchten (oberen) und der trockeneren (unteren) Gruppe an Messkurven kann vorgenommen werden. Die Größenordnung, in denen sich die Absolutwerte bewegen, stimmen zudem mit Literaturwerten für Ziegel im trockenen und feuchten Zustand überein. (Agliata et al. 2018)

Die Auswertung des Imaginärteils wiederum lässt eine feuchtigkeitsabhängige Steigung der Messkurven jenseits von einer Frequenz bei 1 GHz erkennen. Zur Veranschaulichung wurden die Verläufe in Abbildung 11 daher bei dieser Frequenz normiert.

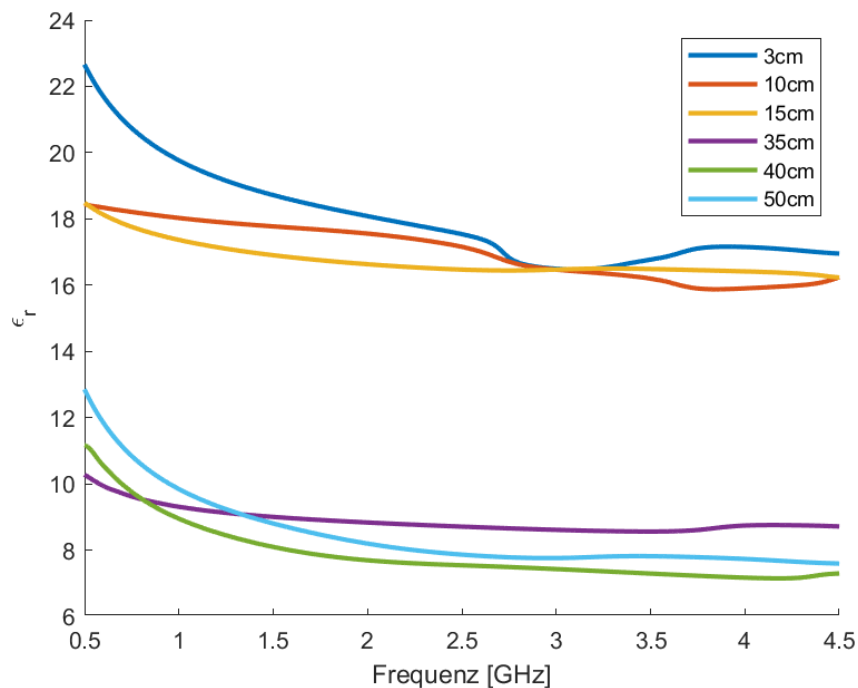


Abbildung 10: Gemessener Realteil der relativen Permittivität der Ziegelwand. Obere drei Kurven (3-15 cm): nasser Bereich, untere drei Kurven (35-50 cm): trockener Bereich

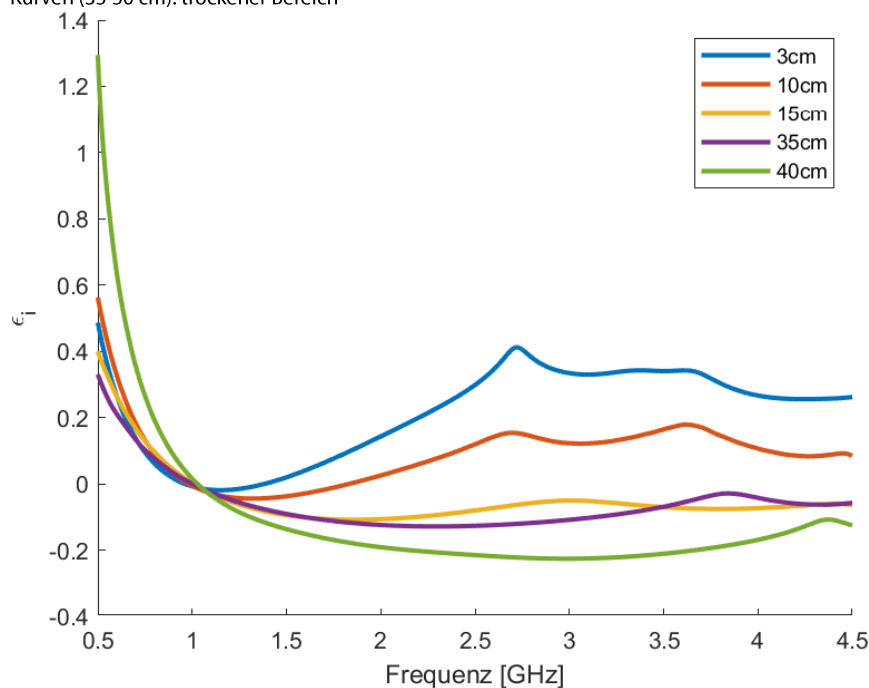


Abbildung 11 Gemessener Imaginärteil der relativen Permittivität der Ziegelwand: 3-15 cm = nasser Bereich, 35 – 40 cm = trockener Bereich. Messkurven normiert bei 1 GHz.

Aria Sensing, LT102:

Das Radarmodul sendet nach Herstellerangaben im Frequenzbereich zwischen 6,5 und 8,5 GHz Radarwellen aus. Einsatzgebiet ist laut Herstellerangaben eine Atmungsdetektion von Personen durch Wände hindurch. Das Radarmodul wurde aufgrund des geringen Anschaffungspreises in Betracht gezogen. Anhand von Testmessungen wurde ersichtlich, dass die Pulslänge des Radargeräts mit $\sim 2,5$ ns verhältnismäßig lang zu den $\sim 1,0$ ns des GP8800 ist. In einem Ziegel mit einer Lichtgeschwindigkeit von $\sim 1,3 \cdot 10^8$ m/s entspricht die Pulslänge des LT102 einer Weglänge von 33 cm (bzw. 16,5 cm im Puls-Echo-Betrieb). Bei mehreren Reflexionen

im Mauerwerk mit Abständen kleiner 16,5 cm ist es somit nicht möglich, die Reflexionen zu trennen. In diesem Fall ist die Auswertung mithilfe der Phasen-Spektrum Analyse nicht möglich.

Eine Messung mit dem LT102-Modul ist exemplarisch in Abbildung 12 zu sehen. Als Messobjekt wurden zwei nicht verbaute, einzelstehende Ziegel hintereinander entlang der langen Seite (0,25 m) gelegt. Somit ist die zurückgelegte Strecke 0,5 m (Puls-Echo: 1 m). Die beiden Pulse sind deutlich sichtbar und voneinander getrennt. Der erste Puls entspricht der Reflexion am Übergang zwischen beiden Ziegeln und der zweite Puls wird am hinteren Ziegel am Übergang zur Luft reflektiert.

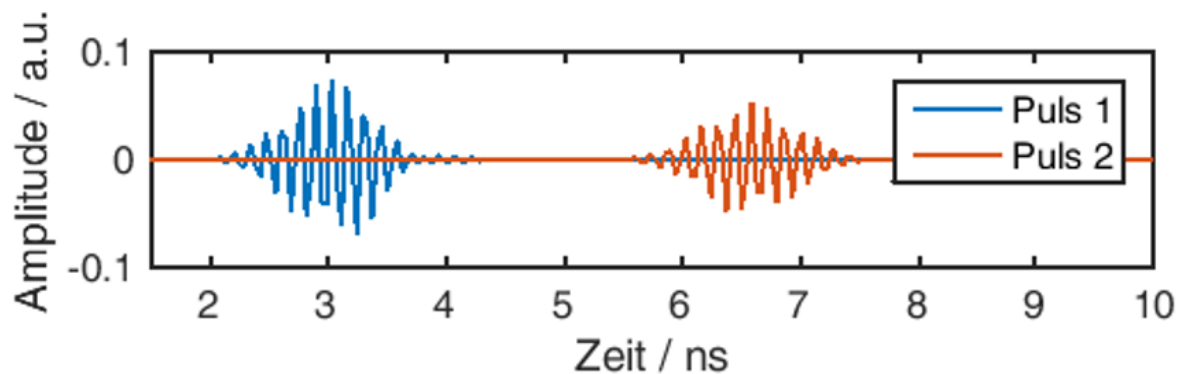


Abbildung 12: Messung an zwei hintereinanderliegenden einzelnen Ziegelsteinen. Puls 1 ist hier das erste detektierte Reflexionssignal und Puls 2 das zweite Signal, reflektiert an der Rückseite des zweiten Ziegels.

In Abbildung 13 ist der Einfluss der Feuchte im Zeitbereich qualitativ an einen einzelnen Ziegel, dargestellt. Zum Zeitpunkt 0 h war der Ziegel vollständig durchfeuchtet. Eine auswertbare Reflexion konnte erst ab ~ 100 h gemessen werden. Ab diesem Zeitpunkt zeigt die weiter abnehmende Feuchte im Ziegel einen starken Einfluss auf das Radarsignal. Zum Zeitpunkt 100 h hat der Ziegel noch $\sim 2,3$ % seines Eigengewichts an Wasser.

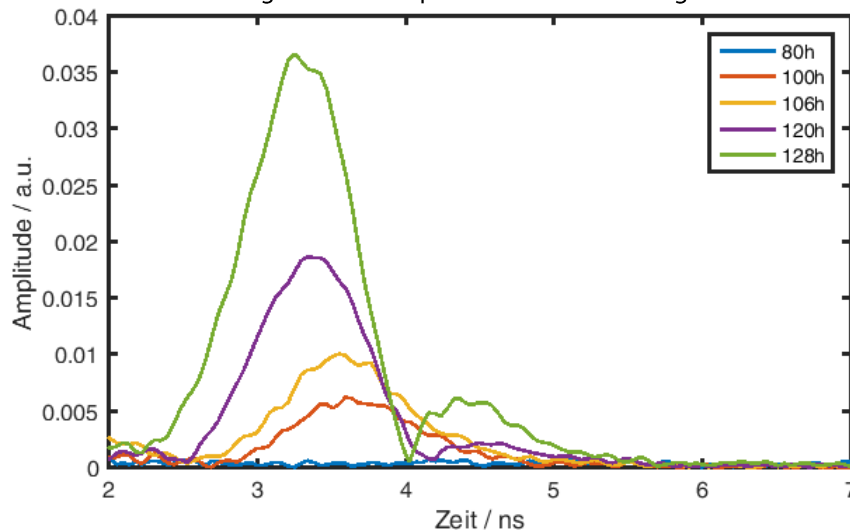


Abbildung 13: Messung des Trocknungsvorgangs an einem einzelnen freistehenden Ziegel (Einhüllende des Zeitsignals, LT102).

Fazit Proceq, GP8800:

Anhand der durchgeführten Testmessungen an unterschiedlichen Baustoffen konnte das Radarmodul GP8800 des Herstellers Screening Eagle für den späteren Einsatz im Projektverlauf geprüft werden. Die Messungen ergaben eine Sensitivität gegenüber der Feuchtigkeit in den Absolutwerten des Realteils der Dielektrizitätszahl sowie den Steigungen der Verläufe des Imaginärteils im Frequenzbereich. Gerade bei sehr feuchten (präparierten) Messkörpern fällt ein Einbruch im Leistungsspektrum des Radargeräts ab circa 2,5 GHz auf. Als Ursache ist hier die zunehmende Dämpfung durch den raschen Anstieg des Imaginärteils der Permittivität zu benennen. Verlässliche Auswertungen oberhalb dieser Frequenz sind dann nicht mehr möglich. Trotzdem

bietet das Gerät für realistische Feuchtigkeitszustände auch für komplexe Prüfkörper ein breites, auswertbares Signalspektrum. Zusammen mit dem vergleichsweise erschwinglichen Preis stellt das Proceq-GP8800 eine leistungsfähige und effiziente Lösung dar, welche im weiteren Projektverlauf hauptsächlich Einsatz fand.

Fazit Aria Sensing, LT102:

Das Modul kann für die Untersuchung von homogenen Mauerwerken verwendet werden, welches nicht zu stark absorbiert. Aufgrund des geringen Preises des Moduls, der Möglichkeit eines weiteren Messbereiches im Frequenzspektrum um 7 GHz sowie den bisherigen Ergebnissen würde das Modul LT102 eine gute Ergänzung zum GP8800-Modul darstellen. Eine alleinige Verwendung des LT102 kommt aufgrund des beschränkten Frequenzbereichs sowie der starken Dämpfung bei großer Wasseraufnahme allerdings nicht in Frage, weswegen das Gerät im weiteren Projektverlauf nicht mehr verwendet wurde.

Versuchsplanung

Optimiertes Simulationsmodell zur Dimensionierung der Mauerwerksprüfkörper

Aufgrund aussagekräftiger Feuchtigkeitsstudien an einzelnen Mauergesteinsproben konnten feuchtigkeitsabhängige Parameterkurven im Frequenzbereich, ähnlich einem Feuchtigkeitskennfeld, für sowohl den Realteil als auch den Imaginärteil der Permittivität erstellt werden. Diese Kennfelder können als Eingabeparameter für das oben erklärte Simulationsmodell genutzt werden, um genauere Aussagen über das Propagationsverhalten von elektromagnetischen Wellen in feuchten Baustoffen zu treffen.

Im Gegensatz zu dem Vorgehen in erster Instanz, wonach nur einzelne Kennlinien des Baustoffs Beton mit einer nur qualitativen Feuchtigkeitsangabe verarbeitet wurden, bietet das gegenwärtige Simulationsmodell die Möglichkeit, verschiedene Baustoffe mit historischem Hintergrund auszuwählen. Mit der Möglichkeit eine stufenlos wählbare Sättigungsfeuchte durch Kennfeldinterpolation (vgl. hierzu Abbildung 14) anzugeben, bietet das Programm einen deutlichen Mehrwert nicht nur für das weitere Projektgeschehen, sondern auch für spätere, praktische Messungen.

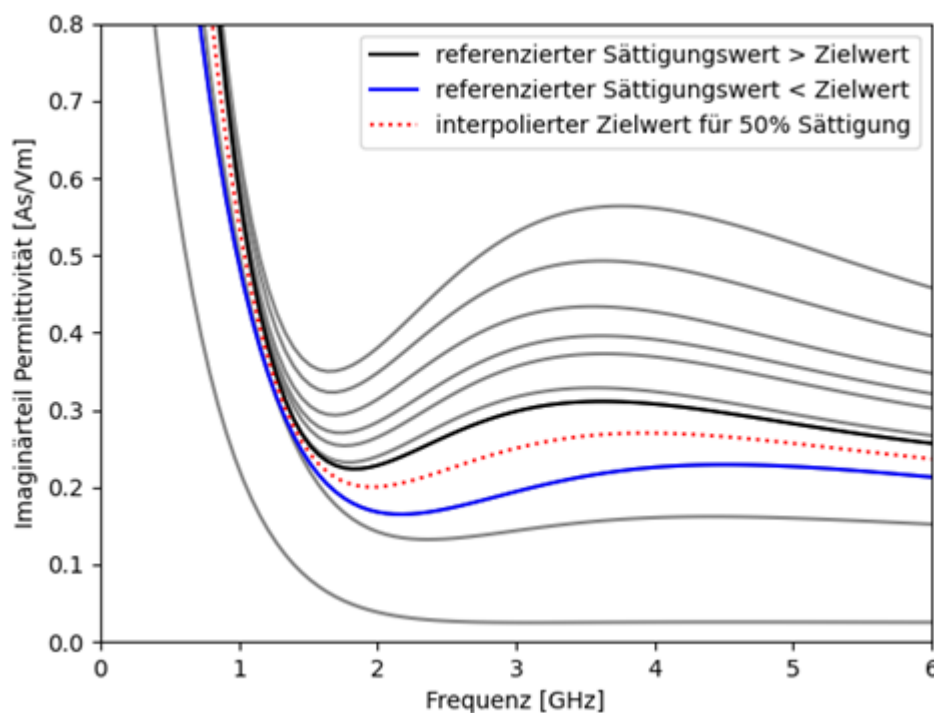


Abbildung 14: Feuchtigkeitskennfeld des Imaginärteils der Permittivität für den Baustoff Ziegel (Volllinien). Frequenzkurve für frei wählbaren Feuchtigkeitswert wird zwischen definierten Referenzkurven interpoliert.

Ein praktischer Anwendungsfall liegt im Abgleich von Simulationsergebnis mit den real aufgenommenen Messdaten für den Fall, dass die Signalintensität der Messung nicht ausreicht, um eine Feuchtigkeitsbestimmung durchzuführen. Dieser Fall kann unter Umständen bei sehr hoher Feuchtigkeit in Verbindung mit hinreichender Salzkontamination auftreten. Ein Abgleich mit den salzfreien Simulationsdaten kann an dieser Stelle den Einfluss der Salze aufzeigen und dem Anwender trotz nicht verwertbarer Messsignale dennoch Informationen über den Zustand des Mauerwerks geben. Eine geringe Rechenzeit von nur wenigen Sekunden sowie der Umstand, dass die Fachkenntnisse für die Erstellung des Simulationsgebietes relativ niederschwellig sind, stellt die Praxistauglichkeit der Anwendung sicher. Die Ergebnisse von Beispielsimulationen zum Baustoff Ziegel mit verschiedener Feuchtigkeit sind in Abbildung 15 angefügt. Neben einer späteren Ankunftszeit des rückreflektierten Impulses bei höheren Feuchtegehalten ist die Signalintensität sichtbar gedämpft.

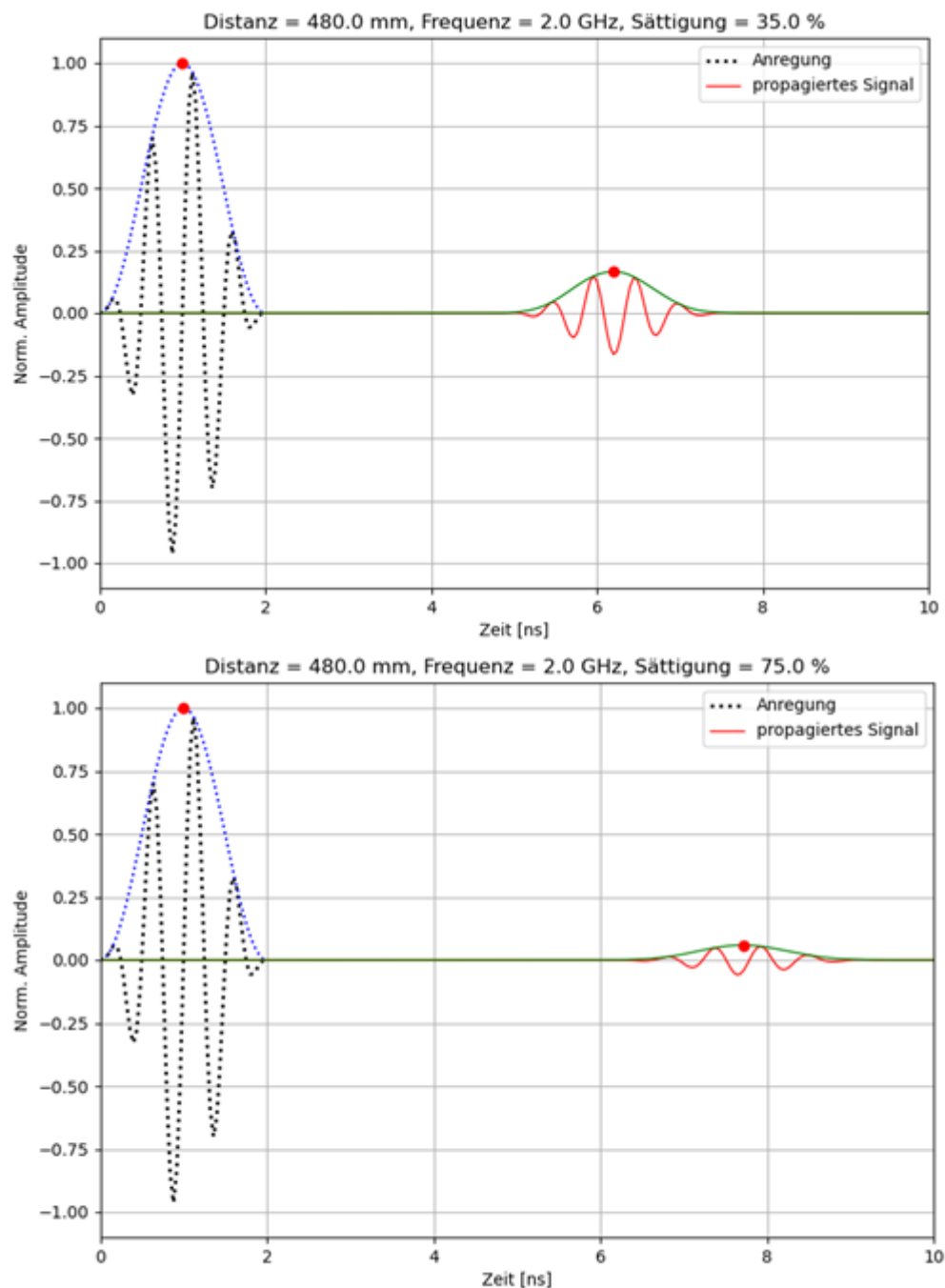


Abbildung 15: Simuliertes Propagationsverhalten eines Radarimpulses in Ziegelstein für verschiedene Feuchtigkeitsgrade. Eine höhere Feuchtigkeit bewirkt nicht nur eine spätere Ankunftszeit, sondern auch eine erhöhte Signaldämpfung.

Versuchsplanung Mauerwerk

Konstruktion und Aufbau der Probekörper

Zu Beginn des Projekts wurden die Spezifikationen und Anforderungen an die herzustellenden Mauerwerksproben und die Messtechnik festgelegt. Erste Vorabtests an bereits bestehenden kleineren Mauerwerksprobekörpern und im Vorfeld schon durchgeführte Simulationen dienten der endgültigen Festlegung der notwendigen Größen eines geeigneten Versuchsfeldes, an dem schlussendlich alle geplanten Messungen durchgeführt werden sollen.

Definition und Dimensionierung der zu vermessenden Mauerwerkstypen

Die herzustellenden Mauerwerksproben für den Versuchsaufbau orientieren sich an historisch typischen Mauerwerksstrukturen. Die zu verwendeten Baumaterialien sollen folgende Eigenschaften erfüllen:

- Ähnlichkeit mit spezifischen Eigenschaften von historischen Baumaterialien (hygrische Eigenschaften, Porenstrukturen, Rohdichte, mineralische Zusammensetzung etc.). Der verwendete Mörtel soll dabei möglichst zementfrei sein.
- Geringe bis keine Salzbelastung, um am Anfang der Messung definierte Zustände herstellen zu können
- Materialien sollen schon weitestgehend charakterisiert und vermessen sein. Somit können schon mal erste Berechnungen in dynamischen Simulationsmodellen (DELPHIN) zu unterschiedlichen Situationen (Feuchte- und Salzverteilung) durchgeführt werden.

Insgesamt sollen zwei unterschiedliche Mauerwerkstypen aufgebaut werden. Auf Basis einer breiten Recherche konnten folgende, zu verwendende Materialien definiert werden:

- Mauerwerk (MW) Typ 1: Ziegelmauerwerk mit einem neu hergestellten Vollziegel, der in seinen Eigenschaften einem historischen Ziegel entspricht. Hier fiel die Wahl auf einen **Vollziegel der Firma Wienerberger (NZ-Voll 2,0/20 240 mm x 115 mm x 71 mm)**
- Mauerwerk (MW) Typ 2: Natursteinmauerwerk mit einem regional vorkommenden Baugestein. Dabei fiel die Wahl auf den **Sander Schilfsandstein**, der bei Sand am Main auch heute noch abgebaut wird und schon seit etwa einem Jahrtausend Verwendung auf der Baustelle findet. Der grüne Mainsandstein stammt aus dem mittleren Keuper und ist ein feinkörniger, homogener und meist tonig gebundener Sandstein. Lagen mit besserer Qualität weisen oft auch eine quarzitische Bindung auf. Die Maße der Bausteine betrug dabei **300 mm x 250 mm x 150 mm bzw. 150 mm x 250 mm x 150 mm (halbe Randsteine)**
- Mörtel: Kalkmörtel ohne Zementanteile, jedoch mit Trass-Anteilen, um den Abbindeprozess zu beschleunigen. In diesem Fall wurde ein vorkonfektionierter **Trasskalkmörtel der Firma Maxit (Mur958)** verwendet, der für Mauerarbeiten, insbesondere auch für das Mauern mit Natursteinen sehr gut geeignet ist.

Von allen verwendeten Materialien wurden verschiedenen Materialparameter bestimmt, vorwiegend mit einem Fokus auf die feuchtetechnischen Kenndaten. Diese Kenndaten werden unter anderem im hygrothermischen Simulationsprogramm „Delphin“ verwendet, um die Qualität der Simulationen zu verbessern. Als Teil der Materialuntersuchung wurden von den mineralischen Baumaterialien Dünnschliffe angefertigt und mikroskopisch untersucht (Abbildung 16 bis Abbildung 21). Um die Porosität und die Porenverteilung der Materialien deutlich sichtbar zu machen, wurde das Einbettharz blau eingefärbt.

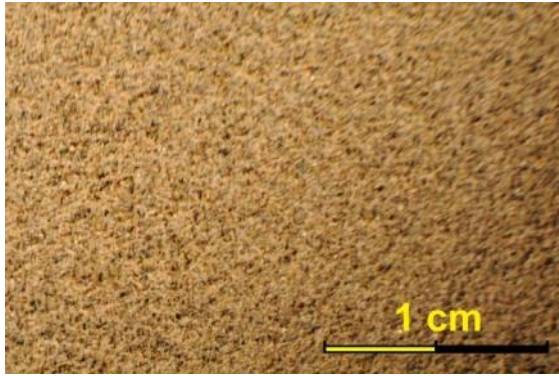


Abbildung 16: Sander Sandstein, gesägte Oberfläche, makroskopische Aufnahme

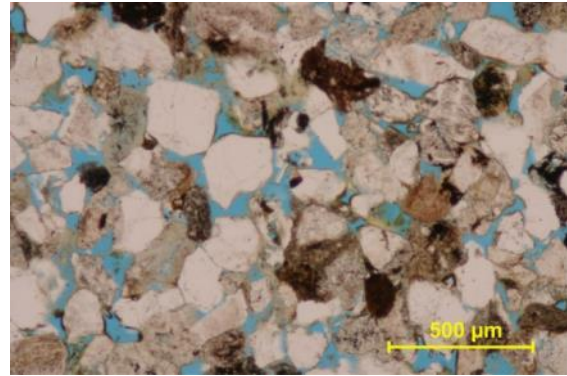


Abbildung 17: Sander Sandstein, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt

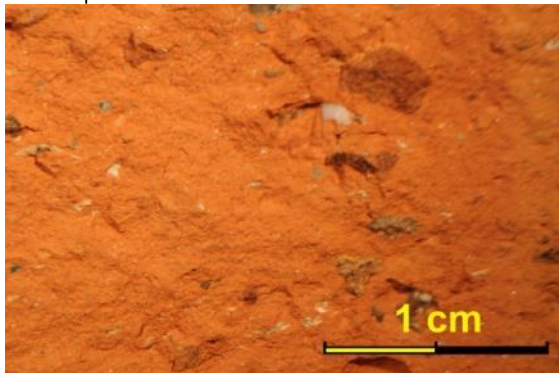


Abbildung 18: Vollziegel Wienerberger makroskopische Aufnahme

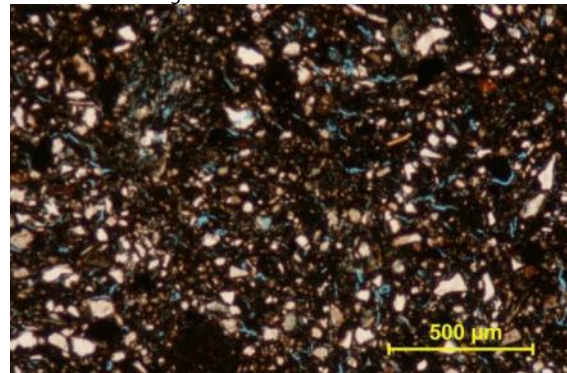


Abbildung 19: Ziegel, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt

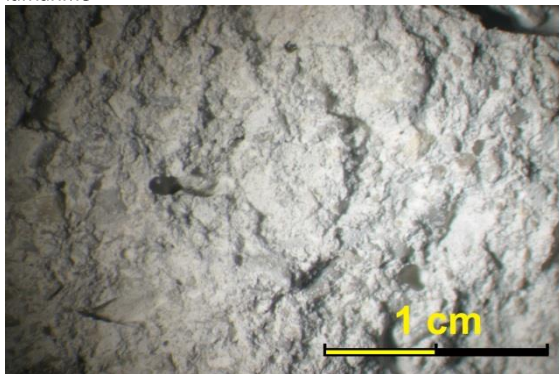


Abbildung 20: Trasskalkmörtel im Streiflicht, makroskopische Aufnahme

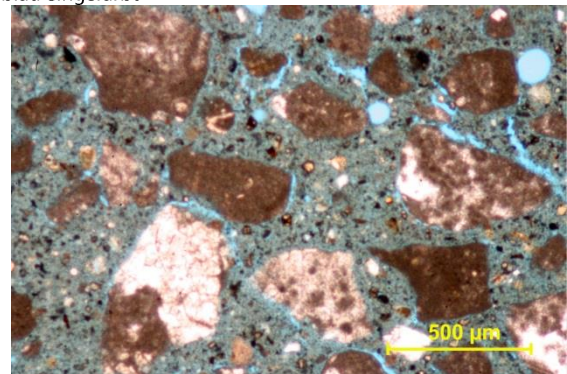


Abbildung 21: Mörtel, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt

In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Kennwerte der einzelnen Baumaterialien aufgeführt. Diese wurden in einem speziell dafür ausgelegten Labor bestimmt. Sie dienen als Grundlage für die feuchtetechnischen Simulationen, die weiter unten noch genauer beschrieben werden.

Tabelle 1: Ermittelte physikalische und feuchtetechnische Kennwerte der Baumaterialien

Probe Nr.	Kennwerte der Materialien							
	WAa [M-%]	WAv [M-%]	WAvol. [Vol. %]	Poros. [Vol. %]	Sättigung	Rein-D. [g/cm³]	Roh-D. [g/cm³]	w-Wert [kg/m²*h ^{0,5}]
Ziegel	13,93	15,32	25,60	28,16	0,91	2,56	1,84	13,6
Sandstein	8,04	11,83	16,16	23,78	0,68	2,64	2,01	8,46
Mörtel	17,42	20,60	29,73	35,16	0,85	2,63	1,71	15,34

Die Dimensionierung der Mauerwerksprüfkörper müssen genügend Platz sowohl für die durchzuführenden Radarmessungen als auch für die parallel durchzuführenden Feuchte- und Salzvergleichsmessungen mit

herkömmlichen Methoden bieten. Bei der Definition des Messfeldes für die Radarmessungen muss zusätzlich auf Randeffekte geachtet werden und soll möglichst weit von Grenzflächen entfernt sein. Gleichzeitig müssen die Mauerwerksproben transportabel bleiben, um sie auch im Innenraum unter kontrollierten Bedingungen aufstellen zu können. In Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden folgende Richtmaße festgelegt: **90 x 25 x 60 cm (LxBxH)**. In Abbildung 22 sind schematisch die Maße sowie die Konstruktion der zwei unterschiedlichen Mauerwerkstypen dargestellt.

Abbildung 23 zeigt einen kurzen Einblick in den Aufbau der Mauerwerksprüfkörper an der Hochschule Coburg. Um die einzelnen Probekörper anheben und somit transportieren zu können, wurden sie auf entsprechende vollverzinkte Gitterroste aufgebaut.

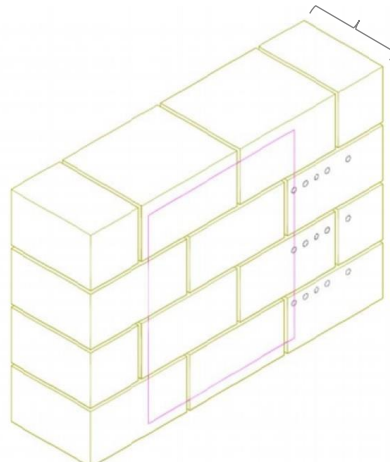
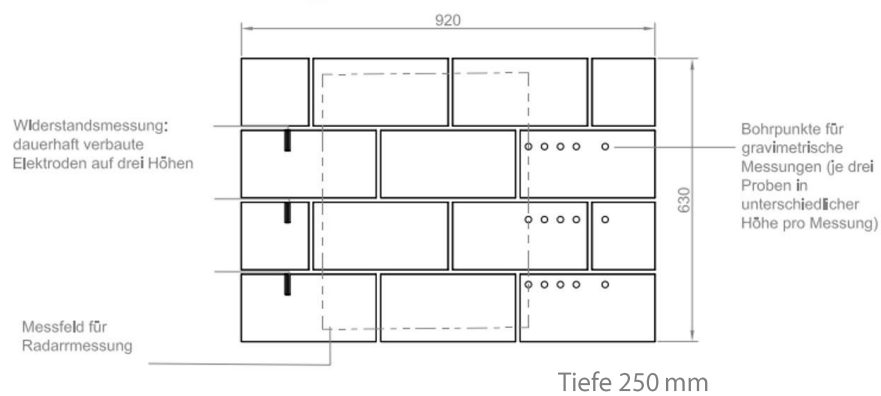
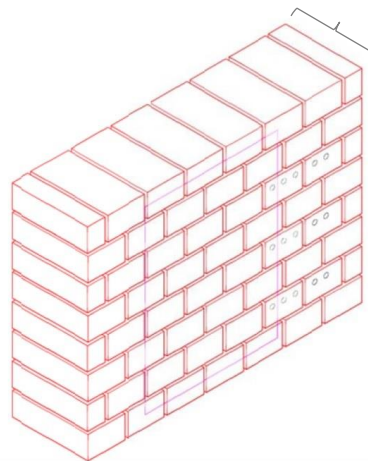
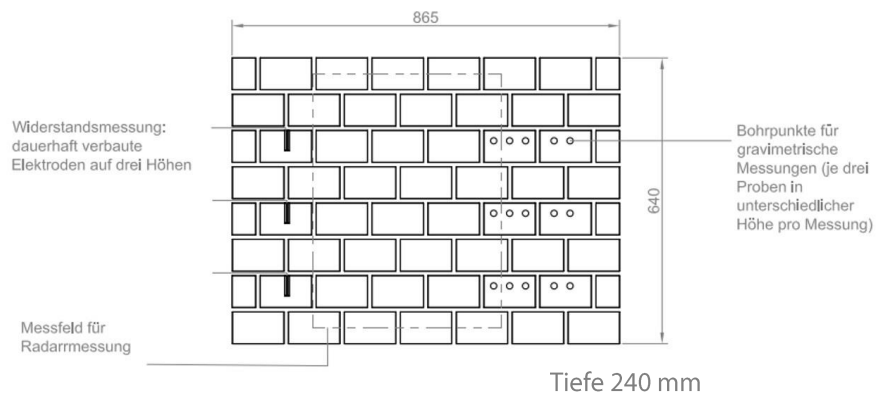


Abbildung 22: Schematische Darstellungen der unterschiedlichen Mauerwerksprüfkörper. Oben: Dimensionen und unterschiedliche Platzierung der Messfelder im Ziegelmauerwerk. Der hier schematisch gezeigte Mauerwerksverbund entspricht nicht dem der endgültig aufgebauten Mauern. Unten: Dimensionen und unterschiedliche Platzierung der Messfelder im Natursteinmauerwerk



Foto: Franziska Haas

Abbildung 23: Aufbau der Mauerwerkskörper. Um die Mauerwerkskörper später besser mit einem Hubwagen anheben zu können, wurden sie auf entsprechenden Gitterrosten aufgebaut.

Um die aufgebauten Mauerwerkskörper gezielt und für einen längeren Zeitraum in einen feuchten Zustand zu bringen, wurden sie paarweise in farblich codierten Stahlprofilwannen gestellt, die dann mit Wasser befüllt werden können. In einer Profilwanne findet jeweils eine Sandsteinmauer und eine Ziegelmauer Platz (Abbildung 24). Diese Wannen haben die Maße einer genormten Europalette und bieten den großen Vorteil, dass sie mit einem Hubwagen bewegt werden können. Um die einzelnen Testkörper eindeutig benennen zu können, wurde die Codierung gemäß Tabelle 2 entwickelt. Die Codierung wurde für die Analysen- und Probenbezeichnungen im gesamten Projektverlauf eingesetzt.

Tabelle 2: Namentliche Codierung der insgesamt 8 Mauerwerksprüfkörper

Wannenfarbe \ Material	Blau	Orange	Grau	Rot
Ziegel	ZB	ZO	ZG	ZR
Sandstein	SB	SO	SG	SR



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 24: Testkörper in den entsprechenden Profilwannen am endgültigen Lagerplatz.

Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes

In Tabelle 3 sind die im Projekt am häufigsten eingesetzten Messmethoden mit einer kurzen Charakterisierung aufgeführt. Neben der zu entwickelnden Messmethode kamen verschiedene Referenzmessmethoden zum Einsatz. Allen voran wurde die gravimetrische Messung der Feuchte, über die Entnahme von Bohrmehlproben verwendet. Sie dient als Standard und stellt, basierend auf den Ergebnissen, die Messgrundlage für alle weiteren Messmethoden dar.

Als ergänzende Vergleichsmethode und als projektinterne Kontrolle wurde ein fest in die Mauerwerkskörper eingebautes Messsystem, basierend auf dem elektrischen Widerstand herangezogen. Das elektrische Messsystem besteht aus zwei Messingstäben, die mit Hilfe von Spreizdübeln aus Messing in einem Abstand von 4 cm in die Sandsteine/Ziegel verschraubt wurden (siehe Abbildung 25).

Von diesen Elektroden führt jeweils ein Kupferkabel aus dem Mauerwerk heraus und wurde am anderen Ende mit einem farbigen Laborstecker versehen. Durch einen entsprechenden Adapter lassen sich die Kabel somit am Feuchtemessgerät T500 von Trotec anschließen und Messwerte zwischen 15 und 100 digits ablesen (15 trocken, 100 durchfeuchtet). Gemessen wird damit der elektrische Widerstand, der neben dem Wassergehalt im Mauerwerk auch von vorhandenen Salzen und Verunreinigungen abhängig ist.

Tabelle 3: Übersicht der eingesetzten Messmethoden mit Angabe von Messintervall und notwendiger Messvorrichtung

Messmethode	Messintervall	Ergebnisse	Messvorrichtung
Zu entwickelnde Messmethode			
Reflektometrie mit Radarwellen	Beliebig oft möglich	[M-%]	Externe Messung
Referenzmessmethode			
Gravimetrisch über Bohrmehlentnahme	Referenzmessung (Goldstandard), Beurteilung des Ist-Zustands, Messung nur an bestimmten Zeitpunkten vorgesehen	Absolut in [M-%]	Bohrmehlentnahme und anschließende Auswertung der enthaltenen Feuchte durch gravimetrischen Nachweis
Ergänzende Vergleichsmessmethode			
Widerstandsmethode	Beliebig oft möglich	[digits]	Elektroden fest verbaut im MW
Mikrowelle	Beliebig oft möglich	[digits] bzw. [M-%] errechnet über internen Faktor	Externe Messung
Hydromette	Beliebig oft möglich	[digits]	Externe Messung



Foto: Franziska Haas

Abbildung 25: Elektrisches Messsystem. Einbau des elektrischen Messsystems am Beispiel der Ziegelmauern. Im linken Bild sind jeweils zwei mit Hilfe eines Spreizdübels aus Messing in das Material verschraubte Messingstangen zu sehen. Die wegführenden Kabel wurden mit einer Mutter und einem entsprechenden Ringkabelschuh mit dem Messingstab fest verschraubt und mit einer Acrylmasse abgedichtet. Im rechten Bild ist ein schon im Mauerwerksverbund platzierter „Messstein“ zu sehen.

Die Ziegelmauern wurden in der 2ten, 4ten und 6ten Steinlage mit einem Ziegel mit Messsystem versehen, was circa den Höhen 12 cm / 27 cm / 42 cm entspricht (Abbildung 26). Entsprechend wurde auch mit den Natursteinmauern verfahren, wobei hier aufgrund der Geometrie der Bausteine die ersten 3 Reihen mit einem System versehen wurden, was in etwa den Höhen 12 cm / 28 cm / 44 cm entspricht. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Messsystem möglichst am Rand platziert wird, um das für die Radarmessungen vorgesehene Messfeld im zentralen Bereich der Mauer nicht zu stören.

Für die Entnahme der Bohrmehle wurde sich an den verschiedenen Höhenstufen des elektronischen Messsystems orientiert. Für die Bezeichnung der einzelnen Proben wurde folgender Zahlen - und Farbcode am Beispiel der Prüfkörper in der grauen Profilwanne (siehe auch Abbildung 26):

- Unten: ZG_1 bzw. SG_1, Farbe schwarz
- Mitte: ZG_2 bzw. SG_2, Farbe grün
- Oben: ZG_3 bzw. SG_2, Farbe rot
- Zusätzlich wurde noch an den Sandsteinmauern eine vierte Höhenstufe eingeführt: SG_4, Farbe blau

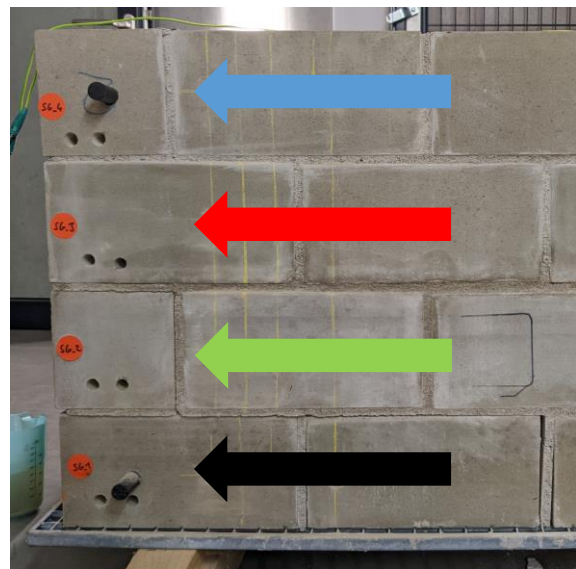
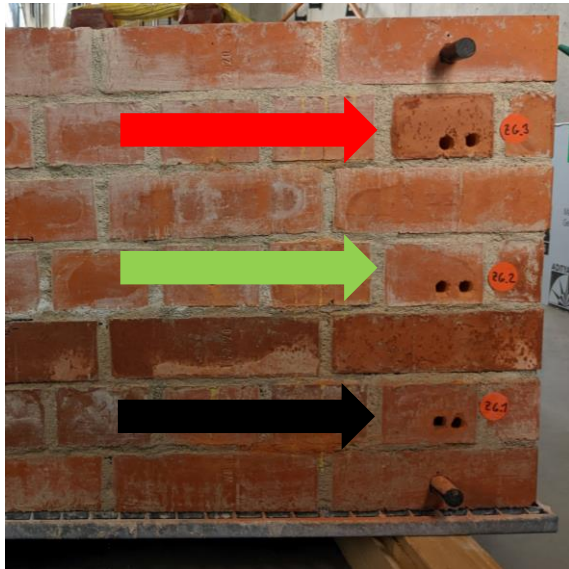


Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 26: Höhe der einzelnen eingebauten „Messsteine“ und den Positionen der ersten Bohrmehlentnahmepositionen. In diesem Fall handelt es sich um die Ziegel- und Sandsteinmauer aus der grauen Wanne. Die einzelnen Bezeichnungen der Messpositionen sind zusätzlich auf den runden, roten Aufklebern geschrieben.

Delphinsimulationen

Schon zu Beginn des Projektes wurden erste einfache Modelle mit den in der Datenbank von Delphin enthaltenen Materialien erstellt.

Delphin ist ein Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport in kapillarporösen Baustoffen. Es kann mit verschiedenen Simulationsarten gearbeitet werden und somit können sowohl 2D Modelle, als auch 3D Modelle konstruiert und mit ihnen gerechnet werden. Bei den Simulationen, die hier durchgeführt wurden, wurde sich nur auf die Transportmechanismen von reinem Wasser ohne Salzzusatz fokussiert (Simulationen von Salztransport ist mit einer entsprechenden Salzdatenbank in Delphin möglich).

Es wurden sowohl 2-dimensionale als auch 3-dimensionale Modelle der Mauerwerksprüfkörper konstruiert. Als Basis für die ersten Simulationen dienten folgende, bereits in der Datenbank enthaltenen Materialien:

- *Sandstein Sander [567]* für den Sandstein „Sander“
- *Trasskalk-Feinputz Tubag [252]* für den Mauermörtel Maxit Mur958
- *Brick Schlagmann HoBa [1114]* für den Vollziegel der Firma Wienerberger

Um möglichst genaue Ergebnisse bei den Simulationen zu erhalten, wurden feuchtetechnisch kritische Materialparameter wie w-Wert und Sättigungsfeuchte direkt an den verwendeten Baumaterialien gemessen und entsprechend in Delphin ersetzt.

In der folgenden Tabelle sind die endgültigen, für die Simulationen verwendeten Materialparameter aufgelistet.

Tabelle 4: Die in Delphin verwendeten hygrothermischen Materialkennwerte der verwendeten Baustoffe. Fett gedruckte Ziffern wurden direkt am Material gemessen und in Delphin ergänzt. Kursive Ziffern wurden nach Eingabe der gemessenen Kennwerte von Delphin automatisch angepasst. Die restlichen Messwerte basieren auf den in der Delphin-Datenbank bereits enthaltenen Werten.

Basisparameter	Sander Sandstein	Vollziegel	Mörtel (Maxit Mur958)
ρ [kg/m ³]	2010	1840	1710
C_p [J/kg*K]	717	851	1418
λ [W/m*K]	1410	0,938	0,619
μ [-]	25,85	15,42	50,98
W_{sat} [kg/m ³]	161,6	265,3	297,9
W_{80} [kg/m ³]	16,9	1,1	45,2
A_w [kg/m ² *s ^{0,5}]	0,14	0,22	0,25
Kleff [s]	<i>1,6*10⁻⁸</i>	<i>4*10⁻⁹</i>	<i>1,9*10⁻¹⁰</i>

Klimamessungen am endgültigen Standplatz der Prüfkörper ergaben relativ konstante Bedingungen, weswegen die Anfangsbedingungen und auch die sonstigen Klimarandbedingungen auf **18 °C** und **60 %** relative Luftfeuchte festgelegt wurden. In der folgenden Tabelle 5 ist das Szenarium mit entsprechenden Randbedingungen vorgestellt, mit denen in Delphin ein Simulationsmodell erstellt wurde.

Tabelle 5: Randbedingungen für die simulierte Situation an beiden Mauerwerksprüfkörpern.

Situation	Randbedingung	Zeitplan	Bemerkung
Wasserkontakt: kapillares Saugen von unten nach oben	Unten: Wasserkontakt mit einer Druckhöhe von 10cm restliche Seiten: 18 °C; 60 %rH, konstante Bedingungen	Wasserkontakt ständig aktiv Klima ständig aktiv Simulationsdauer: 60d	Für Ziegelmauern und Sandsteinmauern
Alle Seiten offen und dem Raumklima ausgesetzt			

Die Ergebnisse der ersten Simulationen zeigen, dass sich beide Simulationsarten in der Geschwindigkeit der Wasseraufnahme unterscheiden (Abbildung 27). Während die 3D Simulationen einen sehr steilen Anstieg aufweisen und somit in kurzer Zeit sehr viel Wasser aufnehmen, ist der Graph der 2D Simulationen deutlich flacher. Ferner noch zeigen die Ergebnisse, dass sich die maßstabsgetreuen 3D Konstruktionen in der Simulation vollständig über die gesamte Höhe mit Wasser vollgesogen haben. Auch in den 2D Simulationen zeigt sich eine fast vollständige Sättigung des Modells. Hier müssen noch weitere Anpassungen in Form von Flüssigwasserleitwiderständen zwischen den Materialgrenzen (Sandstein – Mörtel bzw. Ziegelstein – Mörtel) vorgenommen werden.

Während bei den 3D Modellen das tatsächliche konstruierte Volumen betrachtet wird, wird die in 2D konstruierte Fläche über die z-Achse in der dritten Dimension unendlich erweitert. Als Berechnungsgrundlage für das Volumen, nimmt Delphin dabei einen Meter in Richtung der z-Achse an.

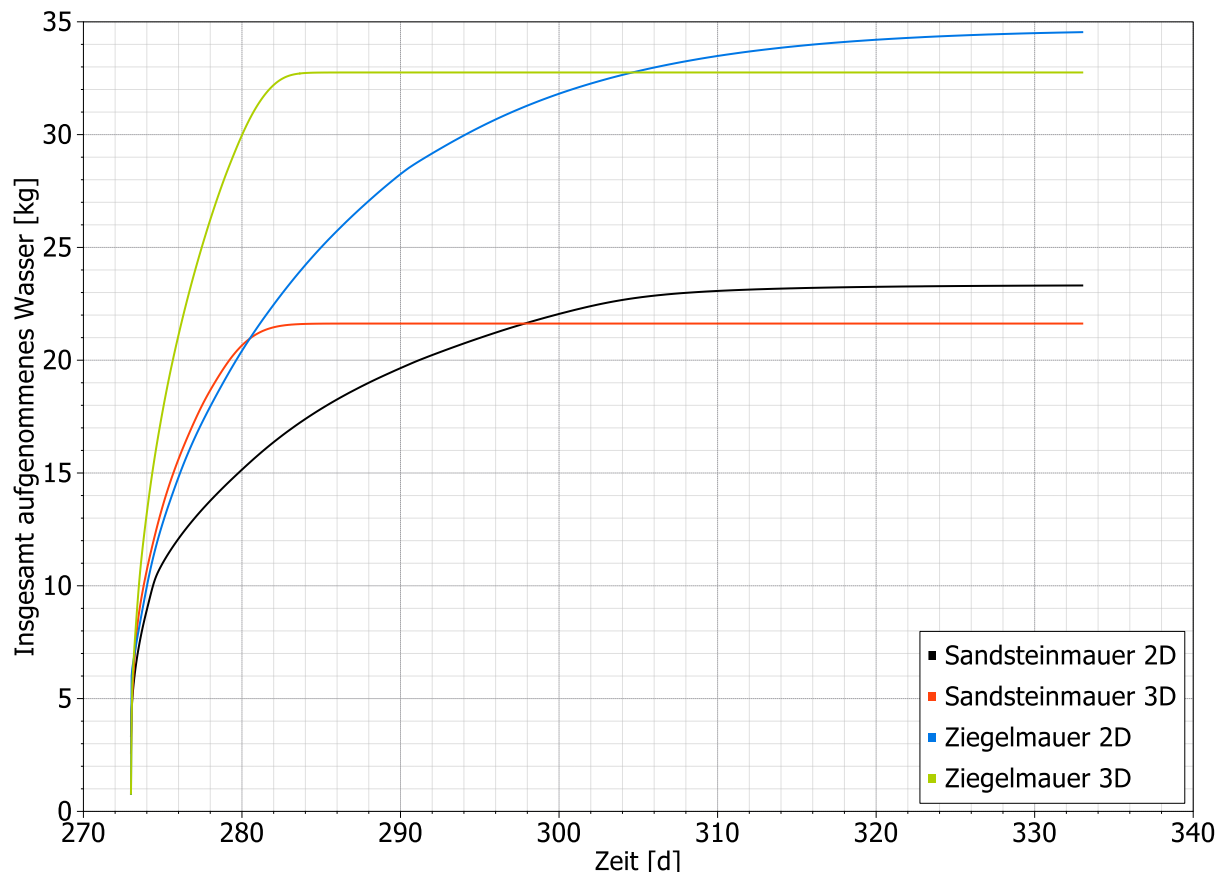


Abbildung 27: Vergleich zwischen 2D und 3D Simulationen. Es ist gut zu sehen, dass in den ersten Tagen schon sehr viel Wasser aufgenommen wird und sich - zumindest bei den dreidimensionalen Modellen laut der Simulationen - schon nach kurzer Zeit eine Sättigung in den konstruierten Mauerwerken einstellt, da kein weiteres Wasser mehr aufgenommen wird. Auch der Wassergehalt der zweidimensionalen Modelle strebt einen Grenzwert an, der während der Dauer dieser Simulation noch nicht erreicht wurde.

Als Wert für den Flüssigwasserleitwiderstand zwischen Mörtel und Ziegel- bzw. Sandstein wurde der Wert $1 \cdot 10^{10}$ m/s festgelegt (Derluyn et al. 2011).

Da sich beide Mauerwerksprüfkörper in ihrem Aufbau und Mauersteinverbund unterscheiden, mussten sie auch im Simulationsprogramm unterschiedlich konstruiert werden. Daraus resultiert, dass sich auch die diskretisierten Gitter beider Konstruktionen unterscheiden. Ein Problem bei 3-dimensionalen Modellen stellt die Menge an einzelnen Diskretisierungselementen dar. Je feiner das Gitter gewählt wurde, desto mehr Berechnungselemente sind vorhanden und folglich gibt es auch genauere Ergebnisse. Auf der anderen Seite steigt somit auch die benötigte Rechenzeit bzw. -leistung. Um möglichst effizient zu arbeiten, sollte das Gitter dementsprechend groß gewählt werden.

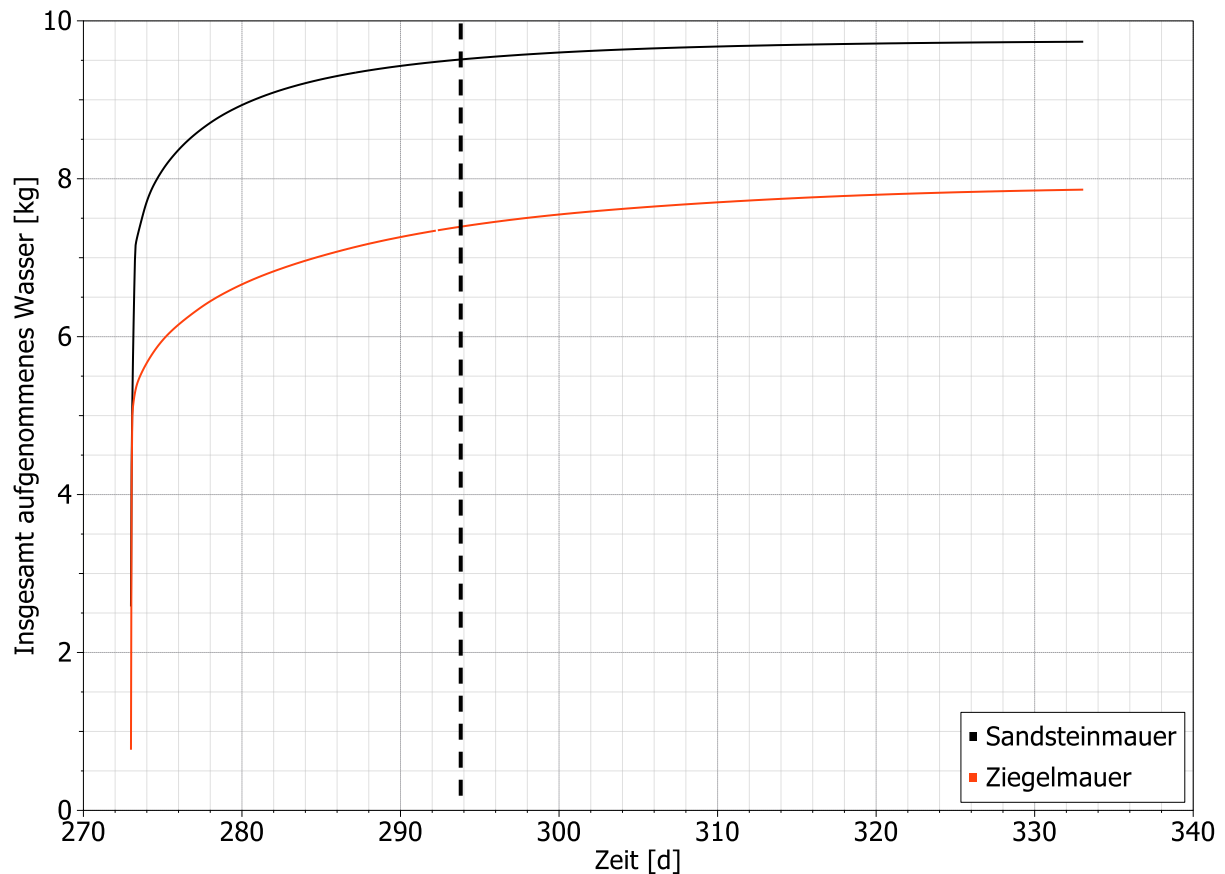


Abbildung 28: Ergebnisse der 3D Simulation mit angepassten Kennwerten der Baumaterialien sowie den allgemein vorherrschenden Randbedingungen und dem Flüssigwasserleitwiderstand von $1 \cdot 10^{10}$ m/s zwischen den Materialgrenzen.

In Abbildung 28 sind die Ergebnisse der Simulation mit angepassten Bedingungen dargestellt. Die Simulationsdauer betrug insgesamt 60 Tage bei gleichen Bedingungen wie in Tabelle 5 beschrieben. Dabei wurde vom Programm berechnet, dass die Ziegelmauer in dieser Zeit knapp 8 kg an Wasser aufgenommen hat. Ausgehend von diesem Wert, wurden bereits über 90 %, also etwa 7,75 kg bereits nach 21 Tagen erreicht. Die Simulation des Natursteins zeigt ein ähnliches Ergebnis und nimmt insgesamt etwa 9,5 kg an Wasser auf. Somit stand fest, dass eine Bewässerungsdauer von mehr als 21 Tagen nur noch einen geringen Effekt auf die absolute Feuchteverteilung in den aufgebauten Mauerwerksprüfkörpern hat.

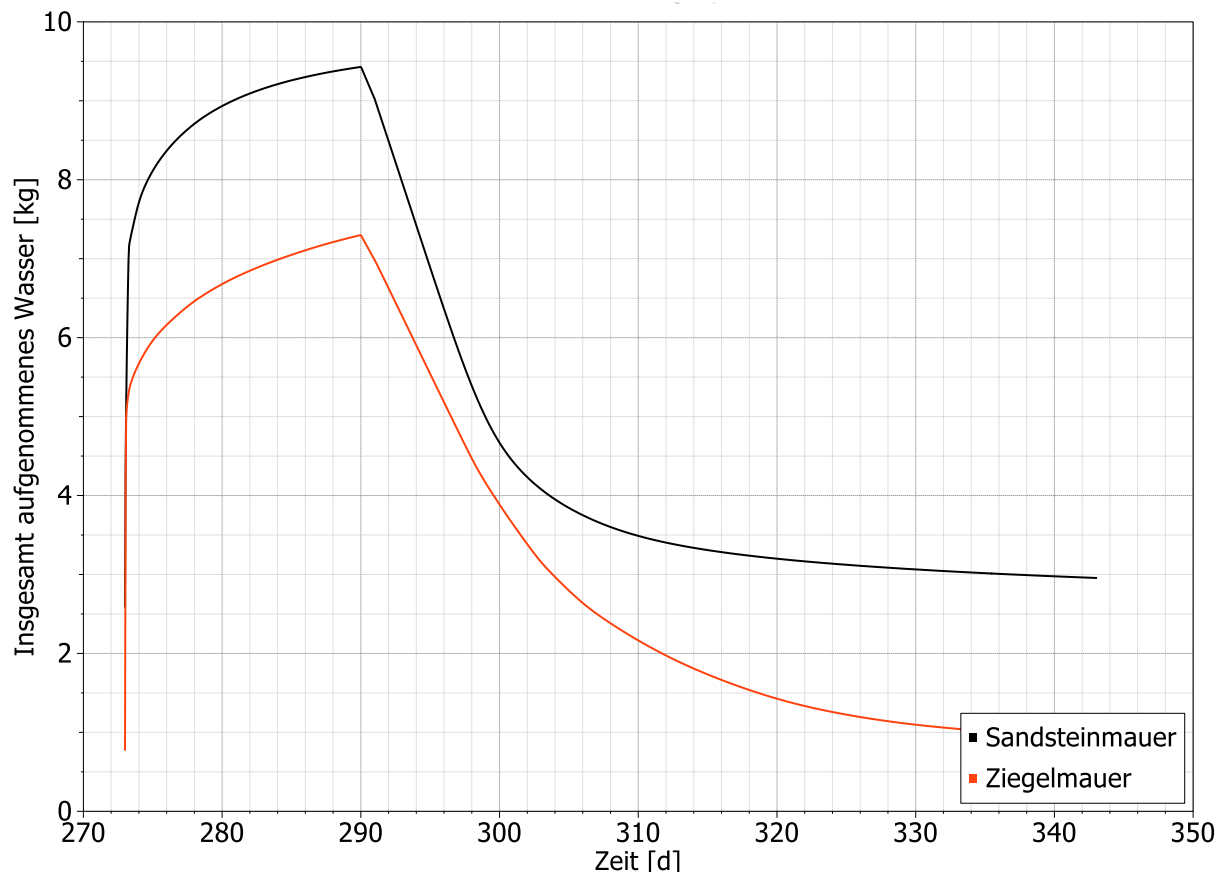


Abbildung 29: Zeitplan eines möglichen Bewässerungszyklus mit Trocknungsphase. Gut zu sehen ist hier, dass in den ersten Tagen schon sehr viel Wasser aufgenommen wird. Dagegen ist die Trocknungsphase deutlich träger und somit können die Mauern bequem in mehreren Feuchtestufen beobachtet werden.

Um eine Vorstellung über die Dauer der Trocknungsphasen zu bekommen, sind in Abbildung 29 die Ergebnisse eines gesamten Zyklus dargestellt. Die Simulationsdauer betrug hier 70 Tage, wobei nach 17 Tagen die Wässerung „beendet“ wurde und die untere Seite den gleichen Bedingungen ausgesetzt ist wie die restlichen Seiten (vergleiche hierzu wieder Tabelle 5).

Die Simulationsergebnisse zeigen gut, dass sich die Trocknungsphasen über einen längeren Zeitraum erstrecken und somit ein im allgemeinen „langsames“ System darstellen. Somit wurden die Radarmessungen, als auch die Entnahme von Bohrmehlproben hauptsächlich während den Phasen der Austrocknungen durchgeführt.

Festlegung Anzahl der zu untersuchenden Feuchtestufen und Salzbelastungen

Um die dauerhafte Messung der Prüfkörper, unabhängig von der Lagerung in Klimakammern, mit verschiedenen Sättigungsgraden zu ermöglichen wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Durch eine parallele Messung des Feuchtegehaltes des Mauerwerks mit der Widerstandsmessung wird eine laufende Kontrolle der Probekörper ermöglicht. Eine Eichung des Widerstandsmesssystems durch gravimetrische Messungen war nicht möglich, diente aber als projektinterne Kontrolle. Nachdem alle Prüfkörper nach Errichtung ausgetrocknet sind und sich am entsprechenden Standort akklimatisiert haben, werden die jeweils baugleichen Körper durch verschiedenes Bewässern zeitlich parallel in verschiedenen Feuchtestufen messbar sein. Somit lassen sich gleichzeitig viele unterschiedliche Situationen vermessen. In Tabelle 6 sind alle im Projekt durchgeführten Zyklen, der verschiedenen Profilwannen dargestellt. Insgesamt wurde jedes Mauerwerkspaar mindesten 2-mal einem Wässerungszyklus unterzogen.

Ein großer Vorteil ist, dass bei einem Fehlschlagen der Radarmessungen aufgrund von zu hohen Feuchte- oder Salzbelastungen sofort reagiert und bei einem neuen Versuch an einer anderen Wanne, Parameter wie Bewässerungszeit oder Salzgehalt geändert und angepasst werden können.

Festlegung der Art und Anzahl der zu untersuchenden Salze

Die Auswahl der Salze soll eine möglichst große Varianz zwischen den einzelnen Ionen abbilden und wenn möglich, typischen bauschädlichen Salzen entsprechen. Zudem sollten sie leicht in größeren Mengen zu besorgen sein.

Folgende Salze wurden dabei ausgewählt:

- Sowohl für die Mauerwerkskörper als auch den Einzelsteinen kam **NaCl (Salz 1)** und **MgSO₄ (Salz 2)** zum Einsatz. Diese Salze sind im Umgang unbedenklich und in größeren Mengen leicht zu beschaffen.
- Als weiteres Salz wurde **KNO₃** ausgewählt. Im Vergleich zu den beiden anderen Salzen ist die Beschaffung deutlich schwieriger und mit höheren Kosten verbunden, weswegen das Salz nur bei Messversuchen an einzelnen Steinen zum Einsatz kam.

Tabelle 6: Durchgeführte Wässerungs- und Trocknungszyklen an den einzelnen Mauerwerksparen. KNO₂ kam bei den großen Mauerwerkskörpern nicht zum Einsatz.

Prüfkörper Messfortschritt	Ziegel / Naturstein blaue Wanne	Ziegel / Naturstein orangene Wanne	Ziegel / Naturstein graue Wanne	Ziegel / Naturstein rote Wanne
1. Zyklus	Nass	Trocken	Trocken	Trocken
2. Zyklus	Trocken	Nass	Trocken	Trocken
3. Zyklus	Nass + Salz 1	Trocken	Trocken	Trocken
4. Zyklus	Trocken	Trocken	Trocken	Nass
5. Zyklus	Trocken	Nass + Salz 2	Nass	Trocken
6. Zyklus	Trocken	Trocken	Trocken	Trocken
7. Zyklus	Trocken	Trocken	Nass + Salz 1	Nass + Salz 2
8. Zyklus	Trocken	Nass	Trocken	

Als Festlegung von Belastungssituationen wurden Konzentrationen nach Tabellenwerken in Abbildung 30 verwendet. Dabei wurde sich zuerst auf mittelschwere bis hohe Konzentrationen beschränkt um die Salzlast davon ausgehend entsprechend anzupassen. Im Fall von schlechten Signalmessungen aufgrund von einer zu starken Dämpfung kann die Konzentration in einem weiteren Wässerungszyklus folglich erniedrigt werden. Die Salzlösungen wurden dabei so eingestellt, dass sich bei einer homogenen und vollständigen Feuchteverteilung im Ziegel die gewählte Konzentration aus der Abbildung 30 in Bezug auf das ofentrockene Gewicht einstellt. Grund für die Verwendung der Ziegelsteine als Referenz ist deren deutlich höhere Sättigungsfeuchte.

Bewertung der Gefährdung	Sulfate [M.%]	Chloride [M.%]	Nitrate [M.%]
unbelastet (Stufe 0)	< 0,02	< 0,01	< 0,02
gering (Stufe I)	< 0,10	< 0,03	< 0,05
Salzbelastung gering	< 0,10	< 0,05	< 0,03
keine Maßn. erforderlich	< 0,10	< 0,03	< 0,05
mittel (Stufe II)	0,1 – 0,2	0,03 – 0,1	0,05 – 0,2
Salzbelastung mittel	0,1 – 0,5	0,05 – 0,2	0,03 – 0,1
Maßn. im Einzelfall zu entscheiden	0,1 – 0,25	0,03 – 0,1	0,05 – 0,15
hoch (Stufe III)	0,2 – 0,8	0,1 – 0,3	0,2 – 0,5
Salzbelastung hoch	> 0,5	> 0,2	> 0,1
Maßn. erforderlich	> 0,25	> 0,1	> 0,15
extrem (Stufe IV)	> 0,8	> 0,3	> 0,5

Abbildung 30: Bewertung der Gefährdung durch unterschiedliche Konzentrationen von Anionen aus bauschädlichen Salzen in Mauerwerken. Übersicht aus Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 2019

Versuchsplanung Einzelsteine und kleine Prüfkörper

Parallel zu den Messungen des Trocknungsverlaufs an den Mauerwerken wurden an einzelnen Bausteinen, die aus denselben Chargen wie die Baumaterialien der Mauerwerksprüfkörper entnommen wurden, ergänzende Radarmessungen durchgeführt.

Ziel dieses Messaufwandes ist es, eine Datenbasis für das KI-Modell zu schaffen und verknüpfte Daten für das supervised learning Modell zu generieren. Zusätzlich können die verknüpften Daten der Radarmessung mit den Ergebnissen der Masseauswertung aus der Darr-Methode als Evaluation der analytischen Auswertemethode hergenommen werden. Außerdem stellen einzelne Steine ein schnelleres System dar und sind in ihren feuchtetechnischen Prozessen dynamischer als die „langsameren“ Mauerwerksprüfkörper (siehe Abbildung 31). Des Weiteren können mit den Einzelsteinen auch verschiedenen Salzkonzentrationen getestet werden. Somit können vor allem Rückschlüsse auf die maximalen Salzkonzentrationen gezogen werden, um diese dann bei den Wässerungsversuchen der Mauerwerksprüfkörper nicht zu überschreiten, sodass das Signal nicht zu stark gedämpft wird und jederzeit aussagekräftige Messungen möglich sind. Wie im vorherigen Kapitel festgelegt wurde zuerst mit Konzentrationen im mittelschweren bis beginnend hohen Belastungsbereich gestartet.

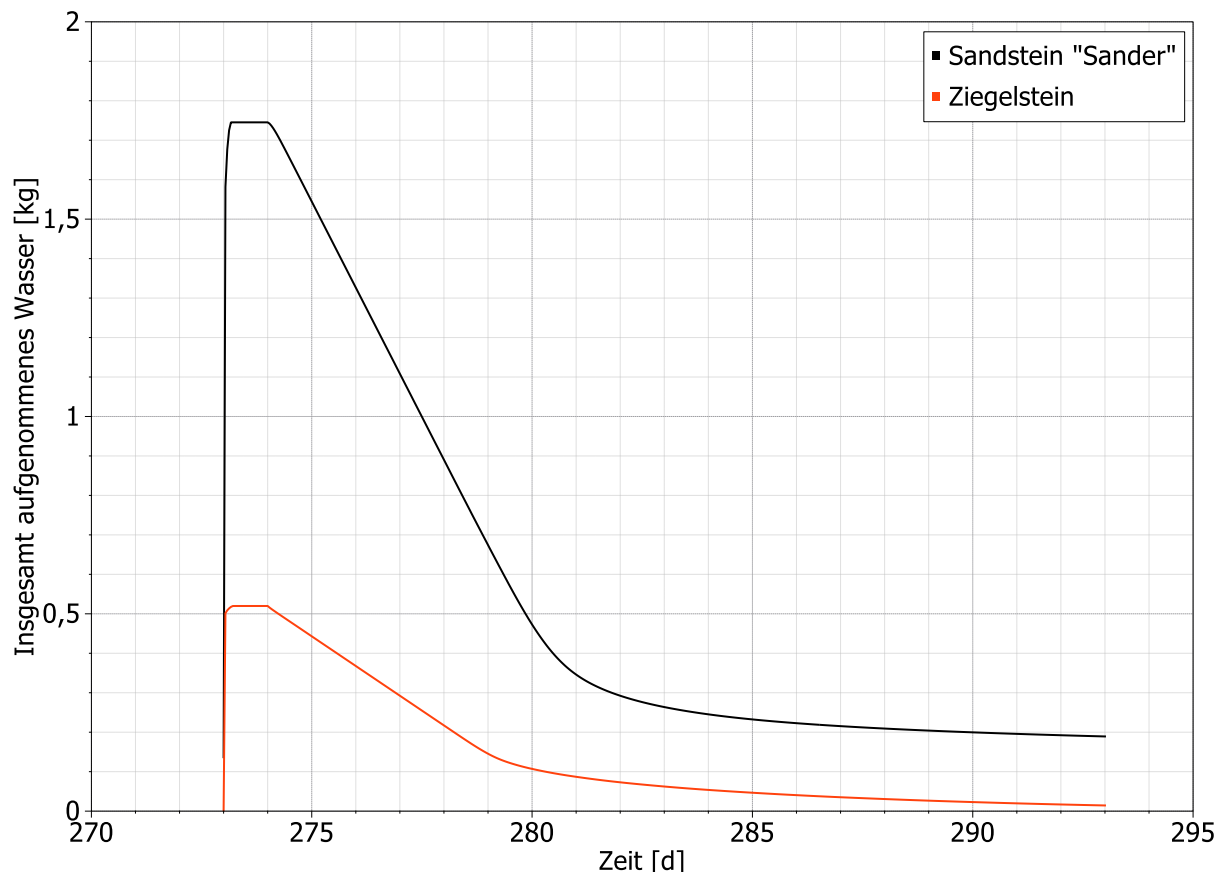


Abbildung 31: Ergebnis Delphinsimulation an einzelnen, maßstabsgetreuen Bausteinmodellen. Die Simulationsdauer beträgt hier 20 Tage. Bereits nach einem Tag im „Wasserbad“ sind die Baumaterialien vollständig gesättigt. Gut zu sehen ist, dass zwischen 6 und 11 Tagen nach Beginn der Trocknung schon ein Großteil des Wassers bereits wieder abgetrocknet ist und theoretisch mit einem weiteren Zyklus begonnen werden kann.

Später im Projektverlauf wurden noch sechs weitere Sandsteinblöcke (nachbestellte Sandsteine eines ähnlichen Typs wie die Mauern, aber in ihren Eigenschaften weitestgehend unbekannt) und kleinere Ziegelverbundkörper mit Salzlösungen versetzt, wobei die Anionenzahl [mol] der drei ausgewählten Salze innerhalb der Lösungen konstant gehalten wurde. Für die Salzlösungen wurden zwei Konzentrationen ausgewählt, einmal 0,012 mol/kg und 0,02 mol/kg. Hier soll herausgefunden werden, wie sich die unterschiedlichen Salze (auch in Bezug auf ihre unterschiedlichen Ionengrößen und Elektronegativitäten) auf die Ergebnisse der Radarmessungen auswirken. Als Referenz wurden ausgewählte Prüfkörper nur mit deionisiertem Wasser behandelt. Per Radar wurde hier wieder der Trocknungsverlauf gemessen, der an insgesamt drei unterschiedlichen Messzeitpunkten über Bohrmehlentnahme und anschließender Trocknung zusätzlich festgehalten wurde.

In Tabelle 7 sind die für die Einzelsteinstudien verwendeten Materialien mit untersuchter Steindicke und beaufschlagten Salzen dargestellt.

Tabelle 7: Eigenschaften der Probekörper der Einzelsteinstudien

Bezeichnung	Stärke	Material	Voruntersuchung mit H ₂ O	Salzstudie
Z1	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
Z2	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
Z3	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
Z4	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
Z5	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
Z6	240 mm	Wienerberger Vollziegel	/	SO ₄ ²⁻ , 0.27 M-%
Z7	240 mm	Wienerberger Vollziegel	/	SO ₄ ²⁻ , 0.8 M-%
ZK1	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	
ZK2	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	
ZK3	240 mm	Wienerberger Vollziegel	x	
S1	400 mm	Schilfsandstein	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
S2	400 mm	Schilfsandstein	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
S3	400 mm	Schilfsandstein	x	SO ₄ ²⁻ , 0.1 M-%
S4	400 mm	Schilfsandstein	x	SO ₄ ²⁻ , 0.1 M-%
S5	400 mm	quarzitischer Sandstein	x	Cl ⁻ , 0.1 M-%
S6	400 mm	Schilfsandstein	x	NO ₃ ⁻ , 0.1 M-%
S7	400 mm	Schilfsandstein	x	NO ₃ ⁻ , 0.1 M-%
S8	500 mm	Sander Sandstein	x	
S9	500 mm	Sander Sandstein	/	Cl ⁻ , 0.1 M-%
S10	500 mm	Sander Sandstein	x	Cl ⁻ , 0.07 M-%
S11	500 mm	Sander Sandstein	/	SO ₄ ²⁻ , 0.19 M-%
S12	500 mm	Sander Sandstein	/	NO ₃ ⁻ , 0.13 M-%
S13	300 mm	Sander Sandstein	/	Cl ⁻ , 0.004 M-%
S14	300 mm	Sander Sandstein	/	SO ₄ ²⁻ , 0.12 M-%
S15	300 mm	Sander Sandstein	/	NO ₃ ⁻ , 0.07 M-%

Versuchsdurchführung

Bewässerung und Bestimmung des Feuchtegehaltes der Mauerwerksprüfkörper

Übliches Vorgehen bei der Bewässerung war, die Profilwannen mit Wasser zu befüllen, bis die erste Ziegellage der Ziegelmauer komplett mit Wasser bedeckt ist. Das entspricht einer Höhe von etwa 8 cm. Zusätzlich wurden an insgesamt zwei Zyklen ausgewählte Mauerwerkspaare zusätzlich noch von oben bewässert. Dazu wurden mit Wasser getränkte Decken und Handtücher auf die Oberseite gelegt und regelmäßig mit Wasser übergossen. Somit sollen möglichst viele Belastungssituationen hergestellt werden. Vor allem an den Natursteinmauerwerken ließen sich die feuchten Stellen und die aktuelle Saughöhe durch rein optisches Betrachten der Oberfläche sehr gut ablesen (siehe Abbildung 32).



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 32: Steighöhe des Wassers, gut erkennbar am Sandsteinmauerwerk.

Entnahme von Bohrmehlproben und Bestimmung der Materialfeuchte mit dem Darr-Verfahren

Feuchtemessung über gravimetrische Bestimmung (Darr-Verfahren)

An nach messtechnisch günstigen, ausgewählten Zeitpunkten wurden jeweils in mehreren Höhenstufen (festgelegt in Kapitel Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes), orientiert an den Höhen des eingebauten elektronischen Widerstandmesssystems, Bohrmehlproben aus definierten Tiefenstufen entnommen. Die gestaffelten Tiefenstufen orientieren sich an der Bohrtiefe von 12 cm, was in etwa die Hälfte des Querschnittes der Mauern entspricht, wobei jede Tiefenstufe jeweils 2 cm beträgt, was insgesamt 6 Teilproben pro Bohrloch entspricht. Um die Zeitdauer und die Probenmenge pro Bohrung möglichst gering zu halten, wurde jeweils nur bis zur Mitte gebohrt, da angenommen wurde und auch die Simulationen in Delphin gezeigt haben, dass sich über das Integral des Mauerquerschnittes die Feuchte gleichmäßig verteilt (Abbildung 33). Die

entnommenen Proben wurden sofort luftdicht verpackt, ins Labor verbracht, dort gewogen und anschließend bis zur Massenkonstanz getrocknet und erneut gewogen (WTA 4-11-02/D, 2002; DIN EN 16682).

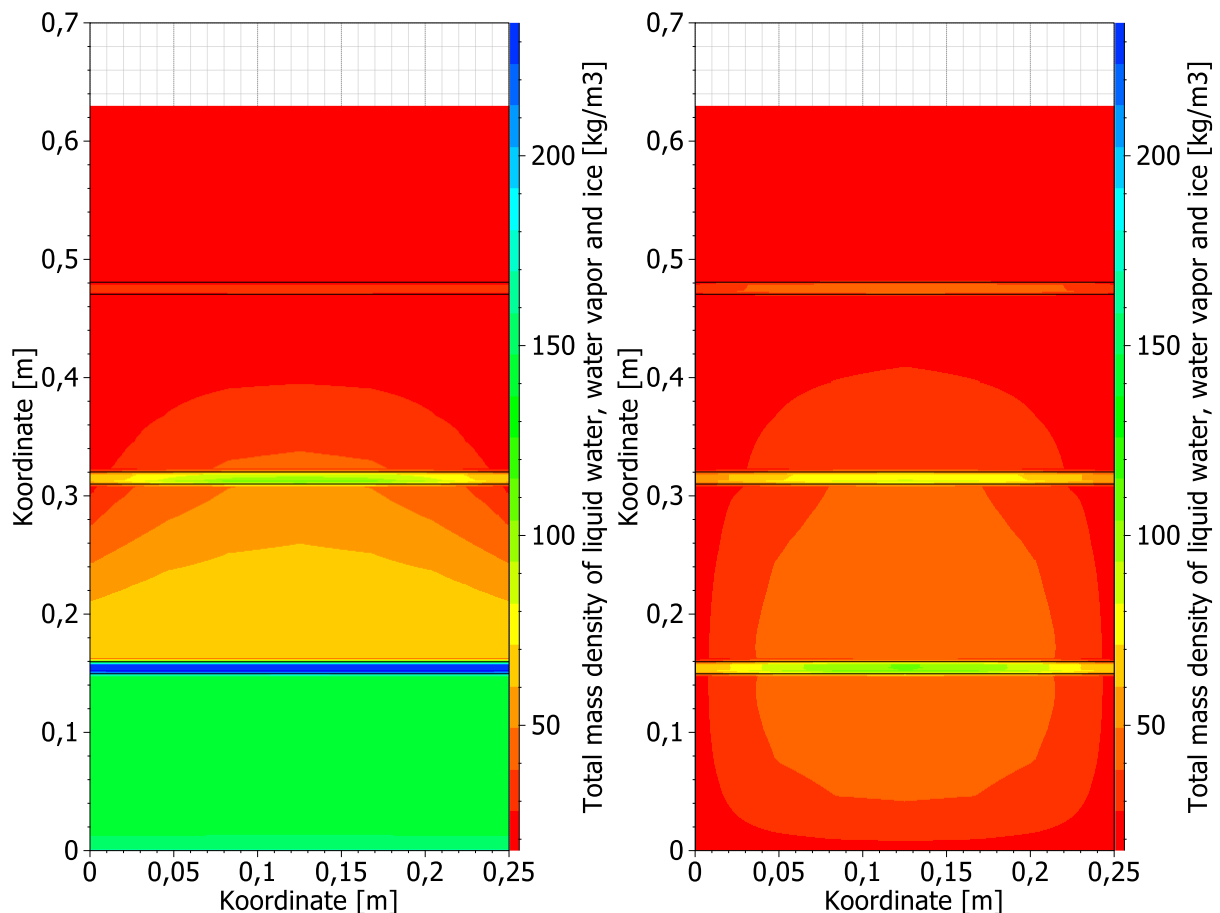


Abbildung 33: Querschnitt durch eine in Delphin konstruierte, dreidimensionale Sandsteinwand. Das Simulationsergebnis zeigt die Feuchteverteilung nach 17 Tagen der Wässerung im linken Bild. Im rechten Bild ist die Situation 10 Tage nach dem Ablassen des Wassers dargestellt. Gut zu sehen ist die über das Integral des Querschnittes gleichmäßige Verteilung des aufgenommenen Wassers.

Eine erste Probenahme an den Prüfkörpern aus Ziegel, um den aktuellen Stand der Mauerwerksfeuchten konkret einschätzen zu können, fand am 21.09.2021 statt. Hier standen die Prüfkörper noch draußen. Die zweite Probenahme geschah am 29.11.21, ein Tag bevor die ersten Mauern unter Wasser gesetzt wurden. Hier wurden alle Mauerwerkskörper aus Ziegel als auch aus Naturstein beprobt, um einen allgemeinen „Anfangszustand“ zu erhalten. In Abbildung 34 ist der Ablauf einer Probenahmeaktion dargestellt.

Vor jedem erneuten Wässerungszyklus wurden Proben an dem entsprechenden Mauerwerkspaar entnommen. Dies wurde oft gepaart mit Beprobungen an anderen Mauerwerkskörpern, die sich zu dem Zeitpunkt in einer Trocknungsphase befanden. Somit konnten die Mauern stets in unterschiedlichen Feuchtezuständen dokumentiert werden.

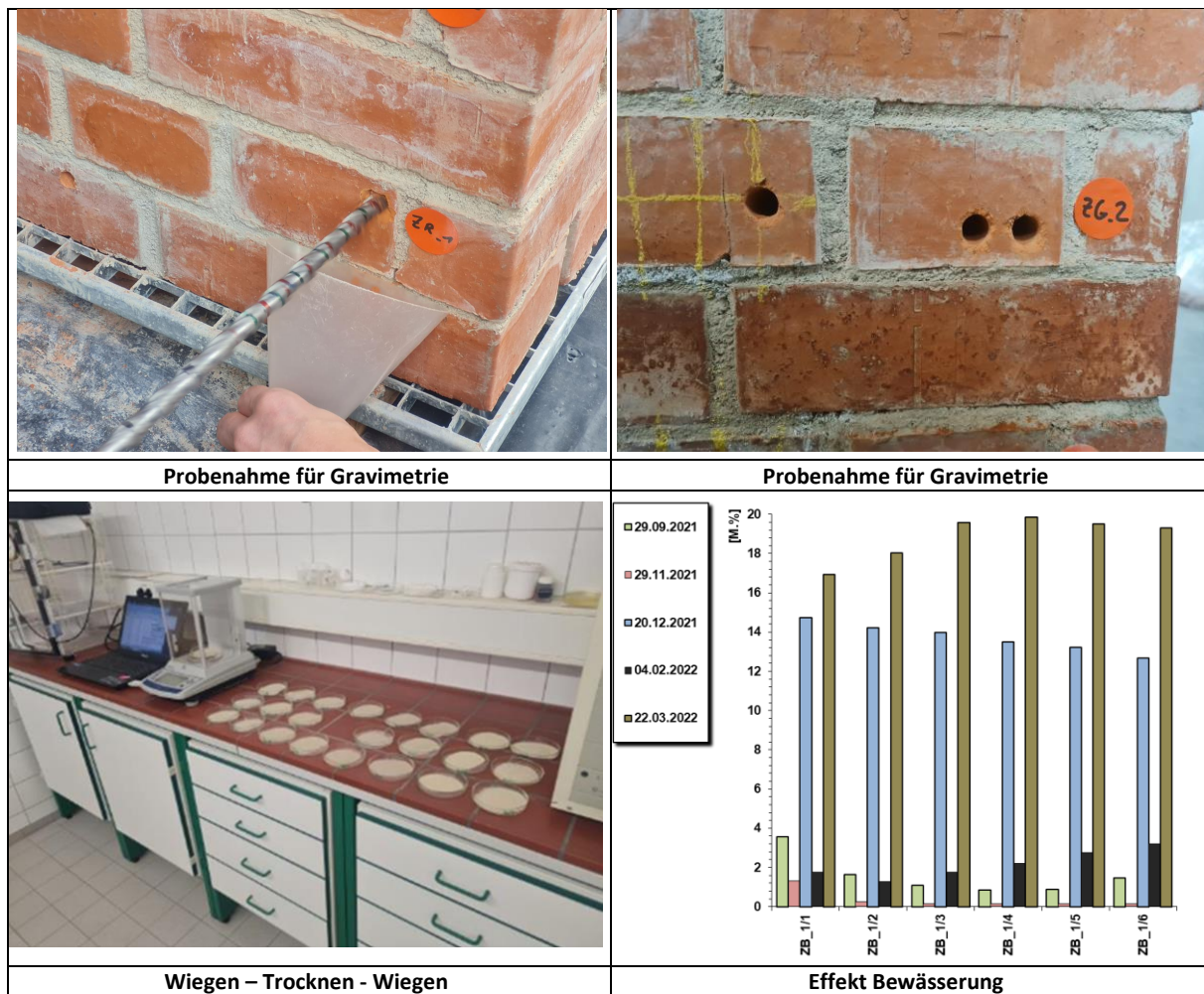


Abbildung 34: Entnahme von Bohrmehlproben und Bestimmung der Entnahmefeuchte

Mit den Werten der so untersuchten Proben zeigt sich deutlich, wie die tatsächliche Feuchteverteilung in den jeweiligen Testmauerwerksprobekörpern in der Tiefenabstufung in ausreichender Genauigkeit ausgebildet ist. Die Verteilung über die Höhe würde möglicherweise eine engere Abstufung erfordern, um beispielsweise den genauen Höhenhorizont des kapillaren Aufstiegs konkreter nachvollziehen zu können.

Um diese genauere Abstufung zu erreichen, wurden in weiteren, größer angelegten Messkampagnen an zwei Mauerwerksparen Bohrmehlproben in einem größeren Umfang entnommen. Zeitgleich wurden flächige Messungen mit dem Radargerät vorgenommen um die Ergebnisse beider Messsysteme direkt vergleichen zu können. Dieses Vorgehen ist Teil des AP9, und wird im Kapitel „Flächenscans an den unterschiedlichen Mauerwerkstypen (konzertierte Messkampagnen)“ genauer erläutert.

Vermessung vorhandener Testkörper mit dem Radarmodul

Messungen am aufgebauten Mauerwerk:

Für die Mauerwerke wurden nach dem Befeuchten (vgl. Abbildung 35, links) der Trocknungsprozess ab dem Zeitpunkt der Trockenlegung mit dem Radargerät über mehrere Wochen hin überwacht. Zu Beginn, als die Trocknung noch schnell voranschritt, wurden zwei Messungen pro Tag durchgeführt, im weiteren Verlauf erfolgten nur noch zwei Messungen pro Woche.

Vermessen wurde mit Hilfe einer Konstruktion aus Kunststoffteilen, die es erlaubt, immer die gleichen Positionen von oben nach unten „abfahren“ zu können (Abbildung 35, rechts). Somit soll bei jeder Messung immer der gleiche Bereich überprüft und mit den davor generierten Daten verglichen werden können.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 35: Links: Mauerwerke kurz vor dem Ablassen des Wassers. Rechts: Messung mit dem Radargerät entlang der Positionierungshilfe aus AP4. Im linken Bild ist gut der Saughorizont am Sandsteinmauerwerk kurz nach dem Ablassen des Wassers zu sehen.

Flächenscans an den unterschiedlichen Mauerwerkstypen (konzertierte Messkampagnen)

Über die Einzelsteinmessungen und den Messungen an den Mauerwerksprüfkörpern können schon eine große Anzahl an Daten gesammelt werden. Diese wurden neben der Erlangung eines allgemeinen Verständnisses des Feuchtigkeit-Salz-Gestein-Systems auch dazu verwendet, dass KI-Modell zu trainieren.

In insgesamt zwei größer angelegten Bohraktionen wird nun auch eine flächenhafte Vermessung durchgeführt. Hier sollen erneut Daten für das KI-Modell gesammelt und somit auch validiert werden. Zudem soll getestet werden, wie schnell eine flächenhafte Messaktion mit dem neuen Messsystem im Vergleich zur etablierten Methode über die Gravimetrie durchführbar ist.

Im angelegten Messfeld – reserviert für die Radarmessungen – wurden während des gesamten Projektverlaufs schon verschiedene B-Scans in einer Linie (von oben nach unten) durchgeführt. Nun soll dies über eine größere Fläche erfolgen, bei einer gleichzeitigen, flächenhaften Validierung der Ergebnisse durch die gravimetrisch ermittelte Entnahmefeuchte.

Neben der Gravimetrie und den Radarmessungen wurden weitere, bereits in der Praxis seit Jahren etablierte Messsysteme eingesetzt. Unter anderem kam eine Gann-Hydromette der Firma Trotec (Bezeichnung T650), ein auf elektrischem Widerstand basierendes Feuchtemessinstrument, ebenfalls von der Firma Trotec (Bezeichnung T500) sowie ein Mikrowellen-Feuchtemessgerät der Firma HF-Sensor mit zwei unterschiedlichen Messköpfen zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser alternativen Messmethoden sollen untereinander, aber vorwiegend mit den ermittelten Werten der Gravimetrie und der über die KI ausgewerteten Daten der Radarmessungen verglichen werden. Eine erste Prognose der erwarteten Feuchtebelastung konnte wieder mit den im Vorfeld durchgeführten Simulationen in Delphin getroffen werden.

Für diesen Zweck wurde für die erste Messaktion ein Mauerwerkspaar ausgesucht (in diesem Fall ZR und SR), und für einen Zeitraum von 19 Tagen (20.07. – 18.08.2022) im Wasserbad gelassen. Zudem wurde dem Wasser so viel MgSO_4 hinzugefügt, dass bei kompletter Sättigung eines Ziegels in etwa eine Konzentration von 0,25 M-% Sulfat nicht überschreitet. Ausschlaggebend ist hier wieder die Sättigungsfeuchte der Ziegel, da diese deutlich mehr Wasser aufnehmen können als der Naturstein.

Für beide Mauerwerksprüfkörper wurde jeweils ein eigens angepasstes Beprobungsraster angelegt (Abbildung 36 und Abbildung 37). In Abbildung 38 ist das Raster an den Mauerwerkskörpern nach der Bohraktion zu sehen. Dabei soll eine gute Balance aus größtmöglicher Probendichte und noch überschaubarer Probenmenge geschaffen werden. Zudem sollen jeweils ausschließlich nur die Mauerwerkssteine und kein Fugenmörtel beprobt werden.

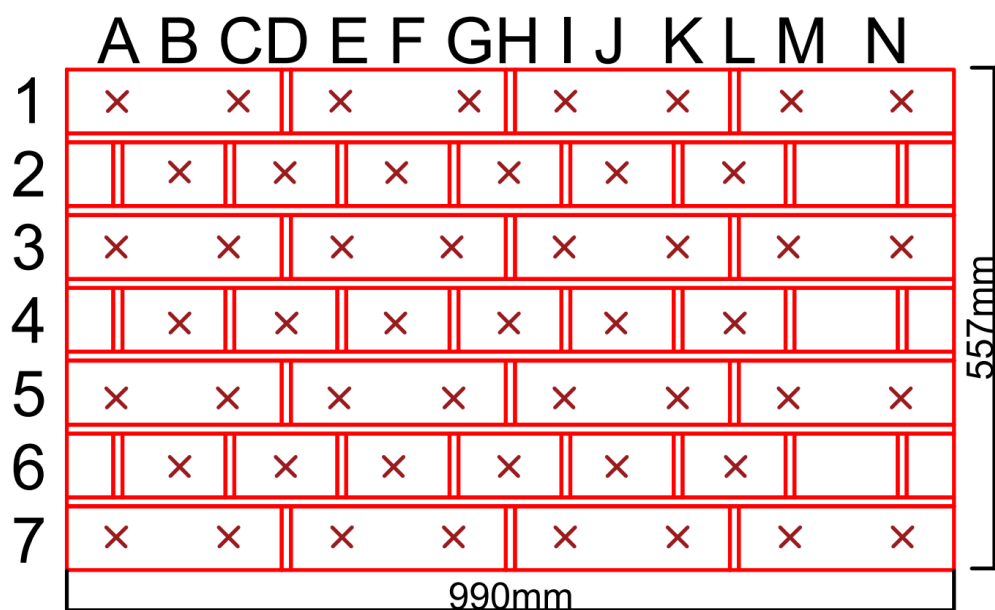


Abbildung 36: Beprobungsraster der Ziegelmauer, Raster für die systematische Probenentnahme an der Ziegelmauer. An jeder mit einem x markierten Stelle wurde eine Messung vorgenommen. Für die Ziegelmauer ergeben sich somit insgesamt 50 Messpunkte.

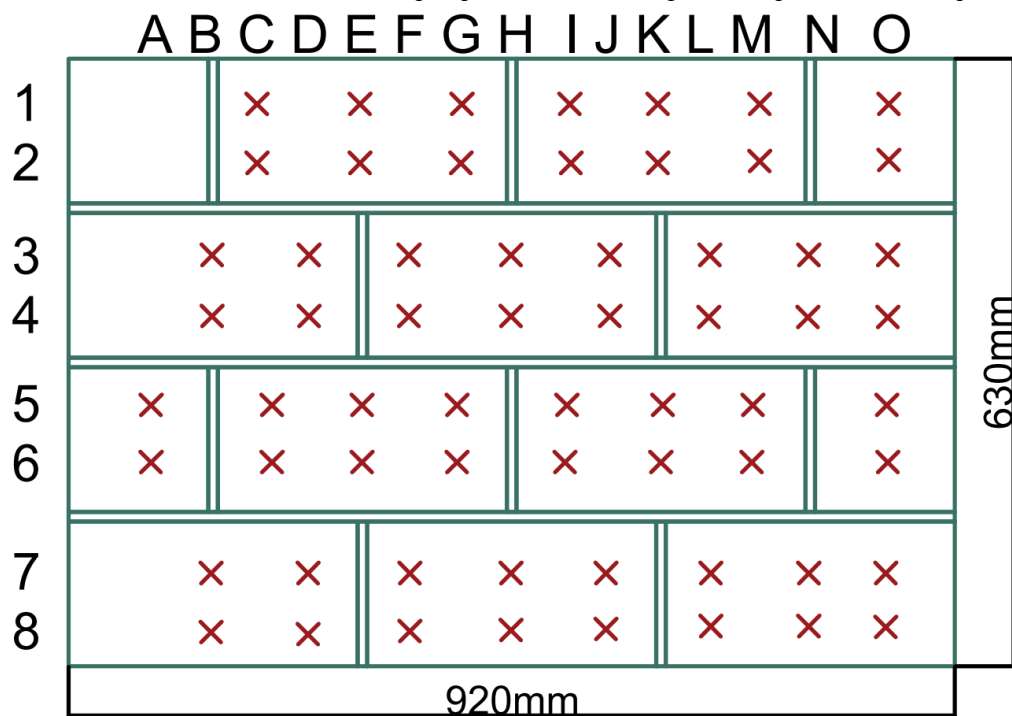


Abbildung 37: Beprobungsraster der Sandsteinmauer, Raster für die systematische Probenentnahme an der Sandsteinmauer. An jeder mit einem x markierten Stelle wurde eine Messung vorgenommen. Für die Sandsteinmauer ergeben sich somit insgesamt 62 Messpunkte.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 38: Erstes Mauerwerkspaar nach der Bohrmehlentnahme. Aufgrund der unterschiedlichen Mauerkonstruktionen wurde für jedes Material ein eigenes orthogonales Raster angelegt.

Basierend auf den Ergebnissen wurde ein weiteres Mauerwerkspaar (in diesem Fall nun ZO und SO) über 19 Tage (09.11 – 28.11.2022) ins Wasserbad gestellt. Um gleichzeitig eine höhere und unregelmäßigere Feuchteverteilung zu erhalten, wurden die Mauerwerkskörper zusätzlich noch zu einer Hälfte von oben bewässert. Auf eine Zugabe an Salz wurde diesmal bewusst verzichtet, da beide Mauern aus einem früheren Wässerungszyklus schon mit MgSO_4 belastet wurden.

Die Anzahl der Entnahmestellen wurde aus zeittechnischen Gründen reduziert. Dennoch wurde darauf geachtet, ein möglichst großes Feld ausreichend zu vermessen (siehe Abbildung 39 und Abbildung 40). In Abbildung 41 sind die Mauerwerkspaare nach der Probenentnahme dargestellt.

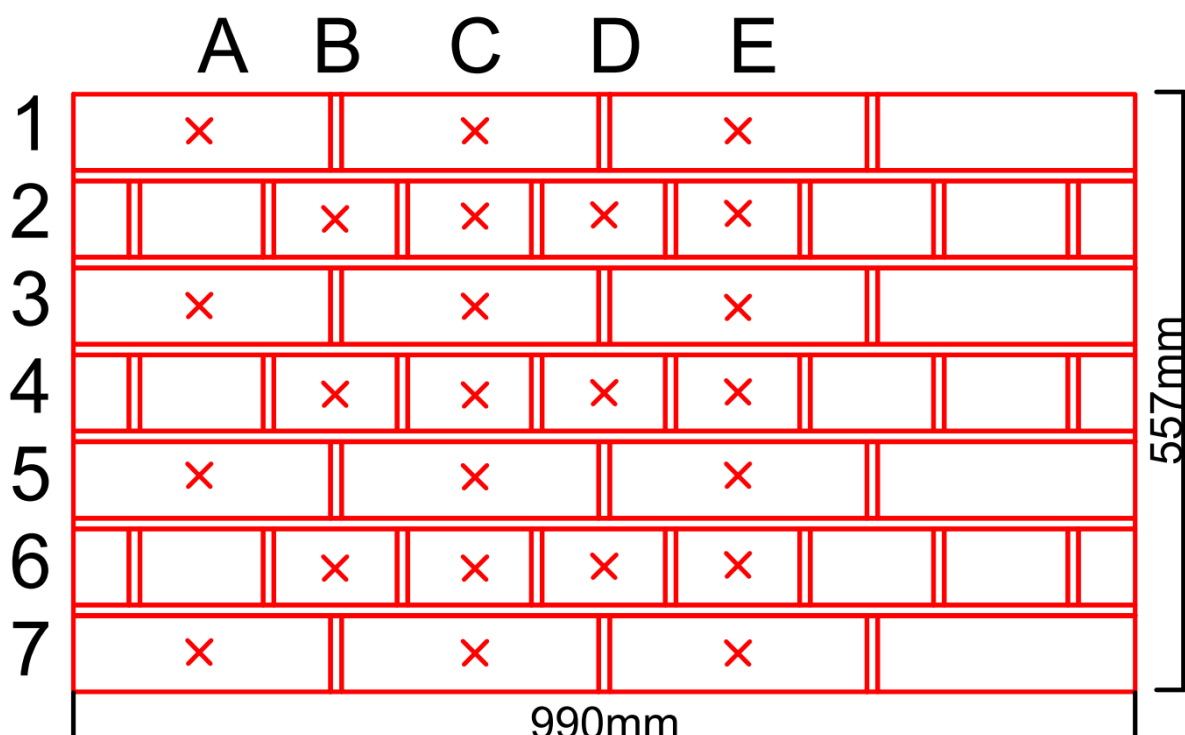


Abbildung 39: Zweites Beprobungsraster der Ziegelmauer. Aus dem angelegten Raster ergeben sich hier nun insgesamt 24 Messpunkte

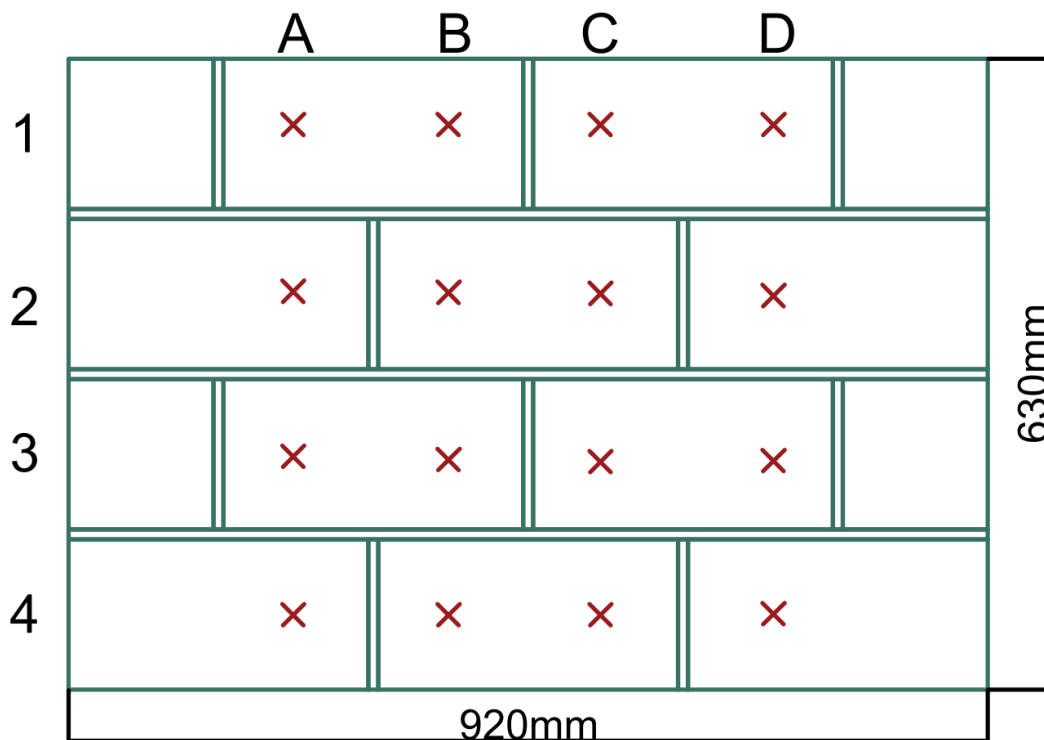


Abbildung 40: Zweites Beprobungsraster der Sandsteinmauer. Durch das angelegte Raster an der Sandsteinmauer ergeben sich hier insgesamt 16 Messpunkte



Abbildung 41: Zweites Mauerwerkspaar mit deutlich reduzierter Probenmenge. Bei der zweiten flächenhaften Messaktion wurde die entnommene Probenmenge reduziert. Hier gut am rechten oberen Eck des Sandsteinprobekörpers (rechts) zu sehen ist die teilweise Zugabe an Wasser von oben. Das linke und deutlich hellere Eck scheint augenscheinlich noch weitestgehend trocken zu sein. Äquivalent dazu, in der Aufnahme allerdings nicht zu erkennen, wurde die linke obere Hälfte der Ziegelmauer zusätzlich bewässert.

Foto: Daniel Frenzel

Bewässerung und Bestimmung des Feuchtegehaltes an Einzelsteinen

Als Probekörper dienten Sand- und Ziegelsteine, welche derselben Charge wie die aufgebauten Mauerwerksprobekörper entnommen wurden.

Konkret wurden einzelne Sandsteinblöcke und Ziegelsteine bis zur Sättigungsfeuchte (unter Atmosphärendruck) in einem Wasserbad entweder mit deionisiertem Wasser oder einer Salzlösung gewässert und anschließend an Luft getrocknet.

Nach Entnahme der Probekörper aus den entsprechenden Wasserbädern wurde deren Trocknungsprozess an Luft mit Radar- und Gewichtsmessungen begleitet. Das Vorgehen hierzu wird in Abbildung 42 dargestellt.

Nachdem sich ein Gleichgewicht mit der Umgebungsfeuchte eingestellt hat, wurden die Proben in einem temperaturgeregelten Ofen bis zur vollständigen Trocknung aufbewahrt, um das absolute Trockengewicht eines jeden Ziegelsteins zu erfassen.

Den durch die Radarmessungen aufgenommenen und durch nachgeschaltete Auswertung ermittelten frequenzabhängigen Kurvenverläufen zum Real- und Imaginärteil der Permittivität konnte jeweils ein definierter Wert der Materialfeuchte in Prozent, bezogen auf das Trockengewicht des Probekörpers, zugewiesen werden. Durch Anpassen von Modellkurven an diese Kurvenverläufe konnten Parameter gefunden werden, welche die Charakteristika der Frequenzkurven repräsentieren und sich mit den Feuchtigkeitswerten verknüpfen lassen.



Foto: Felix Brand

Abbildung 42: Vermessung des Trocknungsprozesses einzelner Mauersteine entlang einer Achse mit dem Radargerät. Fortwährende Gewichtsmessung erlaubt Rückschlüsse über Wassergehalt im Probekörper.

Um nun den Einfluss der verschiedenen Salze untereinander zu vergleichen, wurden an 6 neuen und somit unbekannten Natursteinen sowie an Mauerwerkskörpern im kleineren Maßstab weitere Messungen durchgeführt. Hierzu wurden diese mit verschiedenen Salzlösungen versetzt, die stets die gleiche Anionenmasse besitzen. Nach einigen Tagen wurden sie aus der Lösung herausgenommen und am Standort der Mauerwerksprüfkörper gelagert. In regelmäßigen Abständen wurden an den Blöcken insgesamt 3-mal bzw. 6-mal Bohrmehlproben zur Analyse des Feuchtegehaltes entnommen (Abbildung 43) sowie äquivalent an den Probeentnahmestellen im Vorfeld Radarmessungen durchgeführt.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 43. Links: Sandsteinblock nach der 3. Bohrmehlentnahme. Sandsteinblock der insgesamt schon 3-mal vermessen wurde. Im oberen Drittel sind schon deutliche Salzausblühungen zu sehen. Rechts: kleiner Ziegelprüfkörper mit insgesamt 6 Bohrlöchern.

Messungen an ausgewählten, realen und historischen Mauerwerken

Durch den engen Kontakt mit der Firma ProDenkmal konnten bereits über die gesamte Projektlaufzeit an aktuell laufende Untersuchungskampagnen das hier vorgestellte Radargerät an belasteten und teilweise bereits geschädigten, historischen Objekten auf seine Eignung zur Messung hin evaluiert werden. Über diese Tandemaktionen soll die benötigte Zeit, sowie der invasive Eingriff in die Substanz durch die nötige Probenentnahme auf ein Minimum reduziert werden.

Fokus bei der Auswahl der Projekte lag auf der Ergründung des Mauerwerksaufbaus (Art der Materialien, Fugennetz, Mächtigkeit), sowie die vorrangige Bestimmung des Feuchtegehaltes über Gravimetrie und ergänzend der vorhandenen Schadsalze im Mauerwerk. Dadurch soll ein Abgleich mit den über die Radarmessungen gewonnenen Werte geschehen. In erster Linie waren Projekte von Interesse, an denen die oben genannten Fragestellungen über die Entnahme von Bohrkernen im Trockenbohrverfahren geklärt werden sollen. Somit lässt sich ein maximaler Informationsgewinn aus den entnommenen Proben sicherstellen.

Ziel dieser Messkampagnen ist es, die im Labor generierten Ergebnisse der Radarmessungen zu validieren und die aus dem KI-basierten Auswertalgorithmus gewonnenen Messwerte unter Abgleich mit der Gravimetrie als Referenzmessung auf ihre Messgenauigkeit und Belastbarkeit hin zu überprüfen. Zudem sollen die Stärken und Schwächen der neuen Messmethode unter praxisnahen Bedingungen quantifiziert werden. Soweit realisierbar sollen im Zuge dieser Erkenntnisse erste Verbesserungsmaßnahmen im Rahmen dieses APs entwickelt und umgesetzt werden und diese für eine mögliche zukünftige Umsetzung des Verfahrens zu einem einfachen, handhabbaren Messequipment genutzt werden.

Nürnberger Staatsarchiv



Foto: GoogleMaps

Abbildung 44: Luftaufnahme des Staatsarchives in Nürnberg

Das Archivgebäude, welches 1880 erbaut wurde, konnte bereits im Frühjahr 2022 vermessen werden.

Übergeordnetes Ziel dieser Untersuchungskampagne war es, über die Entnahme von Bohrkernen, das Vorhandensein und die Funktionstüchtigkeit einer möglichen Horizontalsperre zu überprüfen. Dies soll über Bohrungen in insgesamt 3 verschiedenen Höhenstufen geschehen. Der Mauerwerksquerschnitt (etwa 90 cm) wurde dabei nicht komplett erbohrt, sondern bis maximal 80 cm. Um die Probenmenge möglichst gering zu halten, wurden pro Bohrkern 3 kleinere Segmente entnommen (vorne, mitte, hinten). Diese wurden dann im Labor auf ihre Entnahmefeuchte sowie Sättigungefeuchte hin untersucht um daraus den aktuellen Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerkes ableiten zu können.

Die Messungen mit der Radarsonde wurden an ausgewählten Stellen, direkt an den Entnahmestellen der Bohrkern durchgeführt. Die Stellen wurden sowohl mit A-Scans als auch mit B-Scans vermessen, an denen die jeweilige Bohrkernposition markiert wurde. So sollen die Messungen später den Bohrkernen zugeordnet werden können.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 45: Situation einer Wandfläche nach der Bohrkernentnahme. Die Bohrkernentnahme hier fand im Kellergewölbe eines Seitengebäudes des Staatsarchives statt.

Nürnberg Grundschule St. Johannis



Foto: GoogleMaps

Abbildung 46: Luftaufnahme der Grundschule St. Johannis in Nürnberg.

Das Schulgebäude wurde 1882 im Nürnberger Stadtteil St. Johannis errichtet (siehe Abbildung 46).

Da vor allem die Kellerräume mit zum Teil schon sichtbaren, extremen Belastungssituationen und daraus resultierenden Schäden zu kämpfen haben (Abbildung 47), zielten die Untersuchungen auf den Wandaufbau, sowie auf die Bestimmung der Entnahmefeuchte und der vorhandenen Schadsalze ab. Die Beprobung fand jeweils in zwei unterschiedlichen Höhenstufen statt, um auch eine Aussage über die vertikale Feuchteverteilung zu bekommen.

Im Vorfeld wurden Radarmessungen an den Beprobungspunkten durchgeführt. Dabei wurden jeweils A-Scans als Punktmessungen direkt an den Entnahmestellen sowie B-Scans über die Vertikale als Höhenprofile vorgenommen. Erbohrt wurden hier im Anschluss an die Radarmessungen wieder, je nach Mauerwerksstärke bis zu 80 cm. Ähnlich dem Vorgehen beim Nürnberger Staatsarchiv wurden pro Bohrkern etwa drei Segmente aus unterschiedlichen Bohrtiefen entnommen. An den Segmenten wurden im Labor wieder die entsprechenden Entnahmefeuchten, sowie an ausgewählten Proben die jeweilige Sättigungsfeuchte bestimmt.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 47: Situation einer Wandfläche nach der Bohrkernentnahme. Hier gut zu sehen die starke Belastungssituation an einer Kellerwand der Grundschule. Die Situation hinter der Wand ist unbekannt. Durch starke Feuchte- und Salzbelastung ist die aufgetragene Farbe an einigen Stellen schon abgängig, ebenfalls gut erkennbar an dem weißen Pulver auf dem Boden am Fuße der Wand. Im rechten Bild ist gut zu sehen, wie die Farbe sich deutlich vom Untergrund löst. Lokal sind auskristallisierte Salze auf der Oberfläche erkennbar.

Historisches Wohnhaus in Hohenpözl (fränkische Schweiz)



Foto: Franziska Haas

Abbildung 48: Fotos des Wohnhauses. Links: Nordost Fassade; Rechts: Südostfassade mit Hauseingang.

Als drittes Objekt konnte ein altes Wohnhaus mit Fachwerkarchitektur im ersten Obergeschoss, welches sich in Hohenpözl in der fränkischen Schweiz befindet, vermessen werden (Abbildung 48). Der Hof, auf dem das Haus errichtet wurde, besteht schon seit etwa dem 16. Jahrhundert. Das Haus an sich, wie es heute vorzufinden ist, wurde kurz vor der Jahrhundertwende 1880 – 1890 erbaut.

Im Zuge einer Sanierungsmaßnahme wurden im Innenbereich schon diverse Putzflächen, Türen, sowie Teile des Bodens entfernt. Somit konnten der Aufbau und die Konstruktion des Mauerwerks ohne größeren Aufwand bestimmt werden:

- Unregelmäßiges und zwischen 50 – 70 cm mächtiges Kalkbruchsteinmauerwerk an den Außenmauern
- Innengelegenen Zwischenwände meist aus einem einschaligen Ziegelmauerwerk. Stellenweise wurde der Putz bereits entfernt. Die Mächtigkeit dieser Mauern beträgt etwa 13cm.
- Einschalige Ziegelausmauerungen der Gefache im ersten Stockwerk. Mächtigkeit hier etwa 11 cm.



Foto: Franziska Haas

Abbildung 49: Situation im Innenraum des Wohnhauses. Linkes Foto: Blick von der Eingangstür mit bereits vom Putz befreiten Ziegelwänden. Rechtes Foto: Blick auf zwei Außenmauern mit noch vorhandenem Putz und Oberflächengestaltung.

Diese Situation vor Ort erleichterte die Auswahl an Messpunkten und Probeentnahmestellen erheblich (Abbildung 49). Anders wie bei den vorangegangenen Aktionen wurden hier keine Bohrkerns gezogen, sondern es wurde auf einen 12 mm Spiralbohrer zurückgegriffen (siehe Abbildung 50). Speziell an den

innenliegenden Ziegelmauern wurde der komplette Querschnitt erbohrt, ohne eine besondere Tiefenabstufung bei der Probennahme vorzunehmen. Ergänzend wurden noch kleinere Bruchstücke des Ziegels entnommen, an denen die Sättigungsfeuchte bestimmt werden kann.

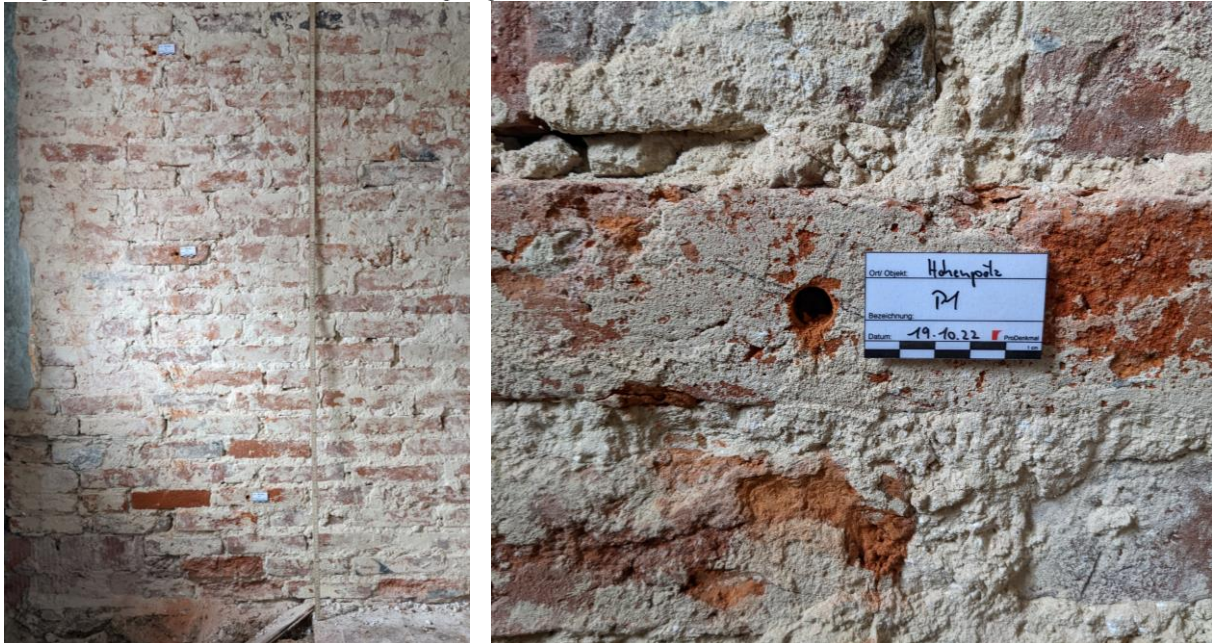


Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 50: Das linke Bild zeigt die Entnahme der Bohrmehlproben in einem Höhenprofil über drei Stufen. Im rechten Bild ist eine Detailaufnahme einer Probeentnahmestelle zu sehen.

Auswertung

Indirektes Messverfahren über den elektrischen Widerstand der eingebauten Elektroden

Über das in den Testkörpern integrierte Messsystem kann kontinuierlich und beliebig oft ein indirekter Feuchtwert abgelesen werden. Die Diagramme in Abbildung 51 zeigen jeweils Kurvenverläufe der Widerstandsmessungen über einen größeren Zeitraum für beide Mauerwerksprüfkörper in der blauen Profilwanne. Gemessen wurde dabei in unregelmäßigen Abständen, mindesten aber 2 – 3-mal pro Woche.

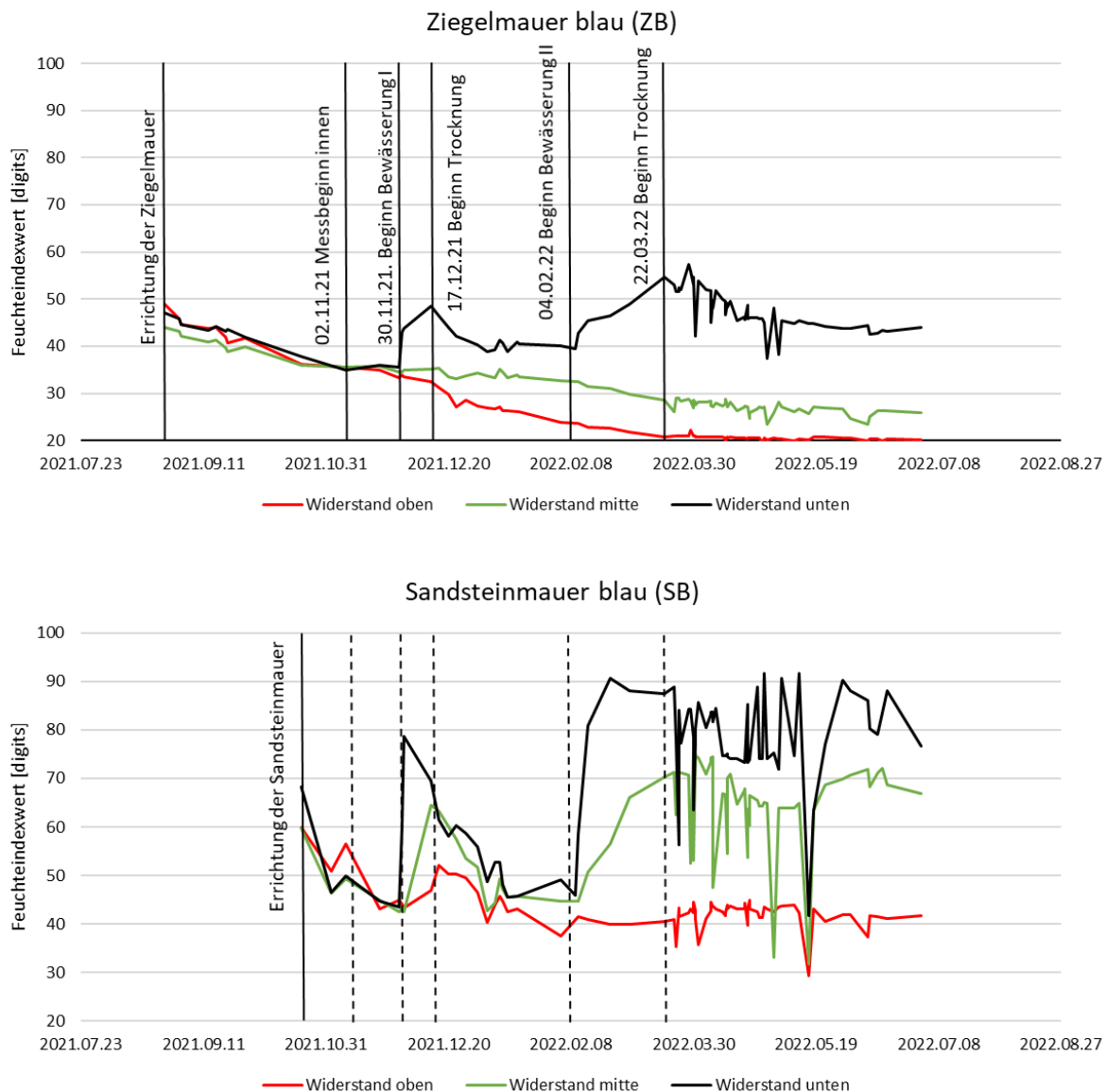


Abbildung 51: Verlauf der Widerstandsmessungen an den Mauerwerksprüfkörpern in der blauen Profilwanne. Die Diagramme zeigen die aufgezeichneten Werte der Widerstandsmessung vom Zeitpunkt der Errichtung der Mauerwerkskörper (Ziegelmauern wurden vor den Natursteinmauern gebaut) bis Anfang Juli 2022. Ebenfalls gekennzeichnet sind die Zeitpunkte an denen die Mauern unter Wasser gesetzt (Bewässerung) und an denen das Wasser abgelassen (Trocknung) wurde.

Zum Zeitpunkt der Wässerung der Mauerwerkskörper ZB/SB am 30.11.2021 liegen die Werte der Ziegelmauer zwischen 33 und 35 digits und die der Natursteine zwischen 42 und 45 digits. Die Skala des Gerätes ist so ausgelegt, dass unterhalb des Grenzwertes von 35 digits ein Material als trocken angenommen werden kann. Werte zwischen 36 und 50 digits stellen einen Grenzfall dar, und es ist, ausgehend von der

Schadenscharakteristik keine Austrocknung erforderlich. Werte über 50 digits werden als feucht beziehungsweise als durchfeuchtet (bei sehr hohen Werten) bewertet.

Schon wenige Tage nach Beginn der Wässerung ist ein Anstieg der Messwerte am untersten Messpunkt zu sehen. Was sich beim Natursteinmauerwerk, etwas verzögert auch in der 2ten Höhenstufe zeigt. Bei diesem Mauerwerkstyp steigen die Werte in der 3ten Stufe zeitlich verzögert leicht an, bleiben aber im Schnitt gleich. Beim Ziegelmauerwerk dagegen bleiben die Werte des in der Mitte befindlichen Messsystems vorerst konstant, fallen aber im späteren Projektverlauf weiter ab und verlaufen parallel zu den Werten im obersten Messsystem. Diese fallen über den beobachteten Zeitraum stetig weiter, was auf eine weitere Austrocknung dieser Ziegellage schließen lässt.

Gut zu sehen sind die zum Teil starken Schwankungen zwischen zwei Messpunkten. Dadurch ist eine Korrelation dieser Messwerte mit den Ergebnissen der Gravimetrie nicht möglich. Je nach Zyklus (Bewässerung oder Trocknung) lassen sich nur Trends zum Nassen bzw. zum Trockenen hin gut erkennen.

Bestimmung des absoluten Wassergehaltes

Direkt vor dem Befüllen der Profilwannen mit Wasser, wurden die entsprechenden Ziegelmauern gewogen. Die Sandsteinmauern waren für den Messbereich der verwendeten Waage zu schwer und konnten nicht gewogen werden. Die Profilwannen wurden anschließend bis zu einer gekennzeichneten Messmarke in Höhe der ersten Mörtelfuge der Ziegelmauer mit Wasser befüllt. Der Wasserstand wurde regelmäßig bis zur Höhenmarke nachgefüllt und die dafür verwendete Menge an Wasser gemessen und protokolliert. Dadurch konnte die absolute Menge an Wasser bestimmt werden, welche von beiden Mauern gemeinsam bis zum Ende der Wässerungsphase aufgesaugt wurde. Verdunstungseffekte wurden dabei nicht berücksichtigt. Am Ende eines Wässerungszyklus wurden die vollgesogenen Ziegelprüfkörper erneut gewogen und somit die insgesamt aufgenommene Menge an Wasser bestimmt.

Auswertung Gravimetrie:

Nachdem die Bohrmehlproben entnommen wurden, wurden sie luftdicht verpackt und in ein Labor verbracht, welches für die gravimetrische Bestimmung von Entnahmefeuchten ausgelegt ist. Die Proben werden gewogen und bis zur Massenkonstanz getrocknet (Trocknungstemperatur 105°C). Im Anschluss daran wird erneut gewogen. Die Gewichts Differenz in Bezug auf das Trockengewicht der Probe ergibt die Entnahmefeuchte in Masseprozent.

Ist die Sättigungsfeuchte unter Atmosphärendruck des Materials, aus dem die Probe entnommen wurde bekannt, kann zusätzlich der materialunabhängige Durchfeuchtungsgrad berechnet werden.

Verarbeitung der Radardaten

Zur frequenz aufgelösten Bestimmung der Dielektrizitätszahl ist eine Auswertung im Frequenzbereich zwingend notwendig. Ein möglicher Ansatz ist die Phasen-Spektrum-Analyse (siehe z.B. Sachse und Pao 1978 und Singer 2015). Hierzu wird eine Referenzkurve im Zeitbereich benötigt, die im Vorfeld aufgenommen wurde. Diese Kurve ermöglicht die Berechnung des Kreuzleistungsspektrums (engl.: Cross Power Spectral Density „CPSD“) zur Bestimmung der frequenzabhängigen Leistung der rückreflektierten Welle. Aus der CPSD konnte zum einen die Information bezüglich der Phase des Signals und damit die Phasengeschwindigkeit, sowie zum anderen die Dämpfung (Amplitudenquotient zur Referenz) abgeleitet werden.

Für nichtmagnetische Medien gilt die Kramers-Kronig-Relation:

$$\varepsilon'(f) = n(f)^2 - k(f)^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon''(f) = 2n(f)k(f) \quad (6)$$

Mit dem Brechungsindex

$$n(f) = \frac{c_0}{c_{ph}(f)} \quad (7)$$

und dem Absorptionskoeffizient

$$k(f) = \ln \frac{I_1(f)}{I_2(f)} \cdot \frac{c_{ph}(f)}{2\pi \cdot f \cdot (x_2 - x_1)} = \ln \frac{I_1(f)}{I_2(f)} \cdot \frac{c_0}{2\pi \cdot f \cdot n(f) \cdot (x_2 - x_1)} \quad (8)$$

Über die Kramers-Kronig-Relation kann somit die frequenzabhängige komplexe Dielektrizitätszahl bestimmt und mit entsprechenden Algorithmen weiterverarbeitet werden.

Die aufgenommenen Zeitsignale der Radarmessungen wurden mit einer eigens entwickelten Auswerterroutine verarbeitet, welche auf der Phasen-Spektrum-Analyse beruht. Zuerst wurde das Kreuzleistungsspektrum berechnet, wie es in Abbildung 52 dargestellt ist. Für jede CPSD gibt es einen Bereich um die Spitzenfrequenz, der durch einen Abfall von 3dB definiert ist. Somit wird bei der weiteren Auswertung sichergestellt, dass eine ausreichende Signalintensität vorhanden ist. Die Dispersionskurven des Real- und Imaginärteils, die mit den CPDS-Kurven verbunden sind, sind in Abbildung 53 dargestellt. Um einen Zusammenhang zwischen den Dispersionskurven und den Feuchtwerten aus den gravimetrischen Messungen zu bekommen, wurden verschiedene Modellparameter über den Spitzenfrequenzbereich der beiden Dispersionskurven bestimmt.

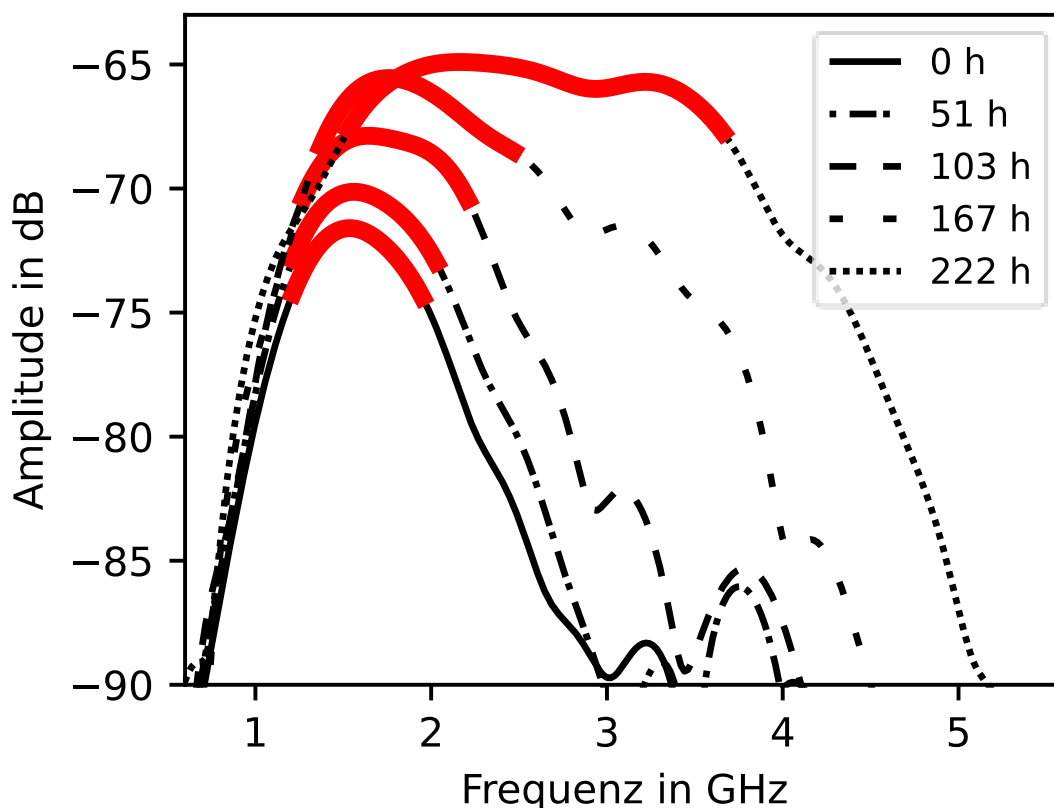


Abbildung 52: Kreuzleistungsspektrum eines ursprünglich gesättigten Ziegels (0 h) zu bestimmten Trocknungszeiten in Stunden (siehe Legende)

Beim Realteil wurde ein lineares und ein Mittelwertmodell hergenommen, welches mit der normalisierten und logarithmisch skalierten CPSD gewichtet wurde. Repräsentativ für den Imaginärteil ist der Absolutwert des lokalen Minimums über den Spitzenfrequenzbereich.

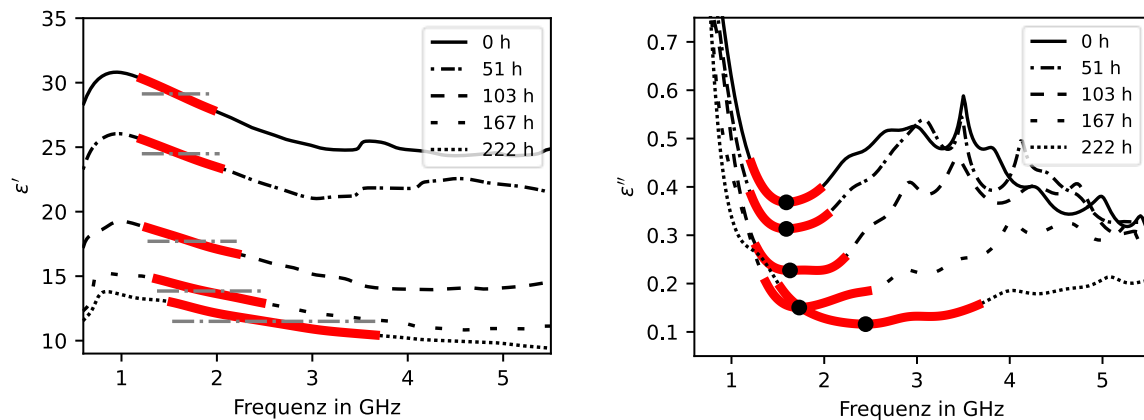


Abbildung 53: Verlauf des Realteils (links) und Imaginärteils (rechts) für verschiedene Trocknungszeitenpunkte wie in Abbildung 52. In rot sind jeweils die Spitzenfrequenzbereiche gekennzeichnet. Für den Realteil ist in hellgrau das Mittelwertmodell eingezeichnet. Für den Imaginärteil wurde das lokale Minimum jeder einzelnen Kurve verwendet (schwarze Punkte).

Eine teilautomatisierte Eingabemaske erleichterte während des Projekts diese Auswerterroutine und ermöglichte es direkt in den Auswertungsvorgang einzugreifen. In Abbildung 54 ist diese graphisch dargestellt, wobei Fenster C) den Kurvenverlauf des Realteils der Permittivität mitsamt automatisierter, angepasster Modellkurven enthält. Selbiges gilt für den Kurvenverlauf des Imaginärteils, welcher in Fenster D) mitsamt Modellparameter ausgegeben wird. Die im Auswertungsprozess nach Abbildung 54 ermittelten Modellparameter konnten mit denen durch Wiegen erfassten prozentualen Feuchtigkeitswerten verknüpft und graphisch dargestellt werden. Für die Verarbeitung der Mauerwerksdaten, ohne Möglichkeit eine gravimetrische Untersuchung durchzuführen, wurde ein automatisiertes Auswerteschema erzeugt, welches gemäß Abbildung 55 die Rohdaten für die Verarbeitung im Machine Learning Algorithmus vorverarbeitet.

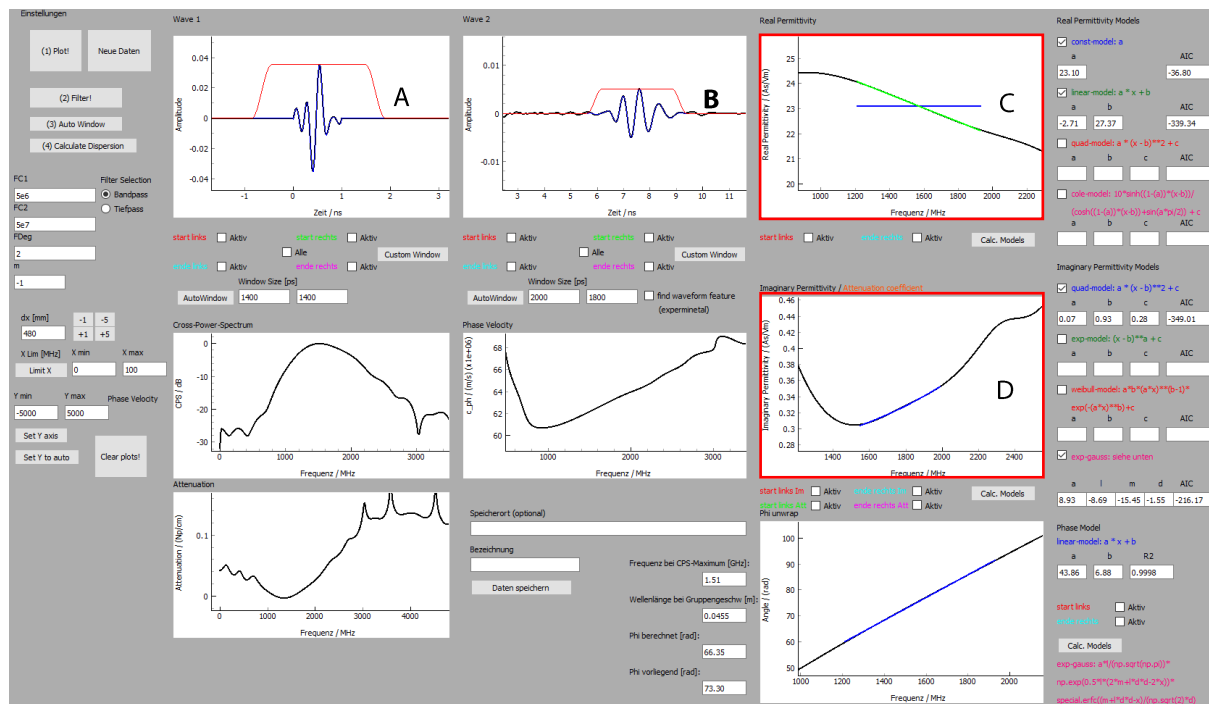


Abbildung 54: Eingabemaske zum Auswertalgorithmus. Eingabeparameter sind Anregung A) und propagiertes Messsignal B). Ausgabe der Verläufe von Real- und Imaginärteil der Permittivität in den entsprechenden Fenstern C) und D).

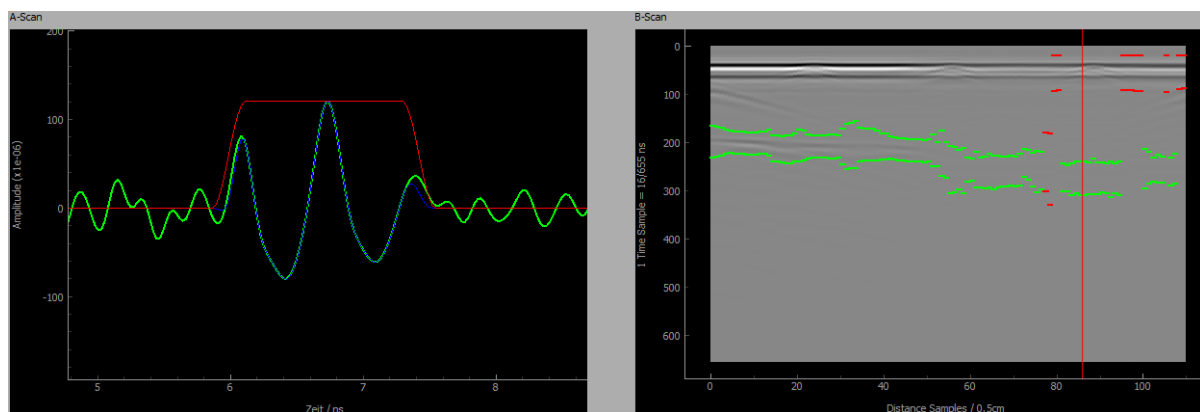


Abbildung 55: Programmoberfläche für die teilautomatisierte Auswertung von mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden B-Scans desselben Mauerwerks. Der Algorithmus ermittelt die Breite der Fensterfunktion für jeden A-Scan (links) automatisch über die Länge eines B-Scan (rechts). Signale mit unzureichender Signalqualität wurden erkannt und herausgefiltert (rechts, rote Streifen).

Machine Learning Modell (Neuronales Netz)

Die Auswertung der Radardaten auf konventionellem Weg bedarf vielfältige Benutzereingaben sowie eine manuelle Auswahl spezieller Messdaten für ein brauchbares Ergebnis.

Eine automatisierte und benutzerunabhängige Auswertung ist mit Machine Learning Algorithmen möglich. Für komplexe Datenstrukturen mit einer Vielzahl an Parametern bieten sich Neuronale Netze an. Die Radardaten aus dem Zeitbereich müssen für die Eingabe in ein solches Netz allerdings vorbereitet werden. Hierbei können die etablierten Algorithmen zur Generierung der Frequenzkurven sowie zusätzliche Nullstellen-Suchen im Zeitbereich genutzt werden. Durch einen Algorithmus, welcher die Rohdaten nach den relevanten Reflexionssignalen durchsucht und automatisch eine Fensterfunktion anwendet, beläuft sich die Nutzerinteraktion lediglich auf die Eingabe der Wandstärke.

Nach ausgiebigen Studien an einzelnen Mauersteinen wurden die relevanten Parameter identifiziert welche die Informationen bezüglich Feuchtigkeit und Salz enthalten. Als Input des Machine Learning Modells müssen schließlich folgende Daten zur Verfügung gestellt werden (siehe Abbildung 56):

- A: Frequenzdaten (Phasenwinkel $\Phi \sim (\epsilon')^2$, Imaginärteil ϵ'')
- B: Zeitbereichsdaten (Nullstellen)

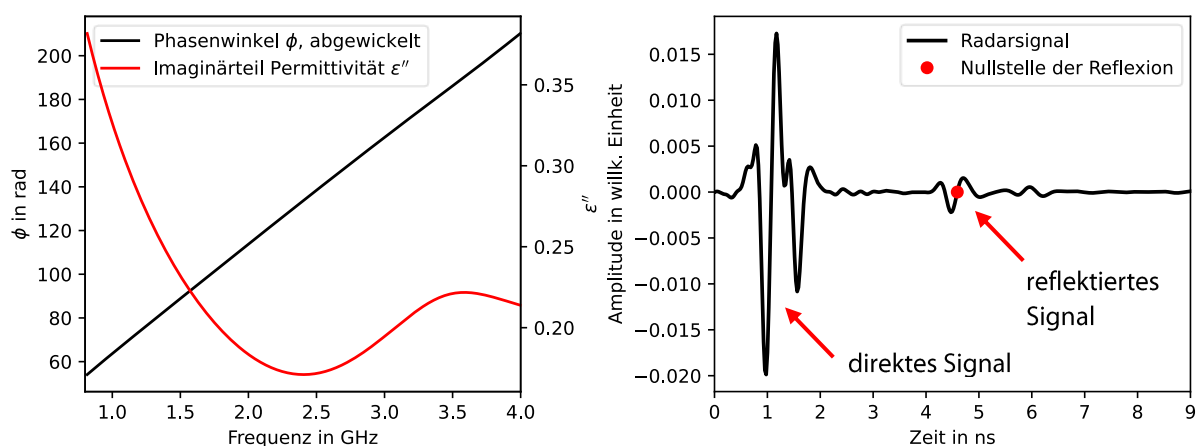


Abbildung 56: Inputvariablen für das Neuronale Netzwerk. Links: Frequenzdaten von Phasenwinkel und Imaginärteil der Permittivität. Rechts: Zeitbereichsdaten mit relevanter Nullstelle.

Anhand Abbildung 57 ist ferner die Struktur der Neuronalen Netze ersichtlich. Für die Frequenzdaten, welche als Vektor vorliegen, haben sich Faltungsschichten ("convolutional layers", in Abbildung 57 „Conv1D“) als vorteilhaft erwiesen. Die einzelnen Nullstellendaten aus dem Zeitbereich werden dagegen mit vollständig verbundenen Schichten ("dense layers", in Abbildung 57 „Dense“) verarbeitet. Zu beachten ist, dass für das Feuchtigkeits- wie auch das Salzmodell, Frequenz- und Zeitbereichsdaten parallel verarbeitet und zum Schluss zusammengeführt werden. Für das Modell zur Vorhersage der qualitativen Salzlast (Abbildung 57, rechts) haben sich weitere, vollständig vernetzte Schichten im Endbereich als vorteilhaft erwiesen. Obwohl beide Netze von der Struktur her ähnlich aufgebaut sind stellt das Modell zur Feuchtigkeitsvorhersage einen Regressor dar, dieser gibt als Ausgabe einen definitiven Wert aus. In diesem konkreten Fall die Feuchtigkeit im Mauerstein in Masseprozent. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit mit der Referenzmethode (Darr Methode), welche ebenfalls einen numerischen Wert bezüglich der Feuchtigkeit liefert gewährleistet.

Salze können aus den in Kapitel „Versuchsreihe zur Kategorisierung / Quantifizierung von Salzen“ genannten Gründen nicht in deren qualitativen Zusammensetzung (Art der Salze) und damit auch absoluten Stoffmenge ermittelt werden. Trotzdem kann eine qualitative Bestimmung der Salzlast anhand ordinaler Merkmale durchgeführt werden. Deshalb werden gestufte Salzkategorien gebildet, deren Wahrscheinlichkeiten mit

einem Klassifikator ermittelt werden können. Diesen Klassifikator bildet das Modell zur Salzvorsage ab, welches eine Wahrscheinlichkeit ausgibt inwiefern ein Messergebnis in die zuvor trainierten Kategorien passt. In diesem Fall die verschiedenen Salzkategorien („keine/geringe Salzlast“, „mittlere Salzlast“, „hohe Salzlast“).

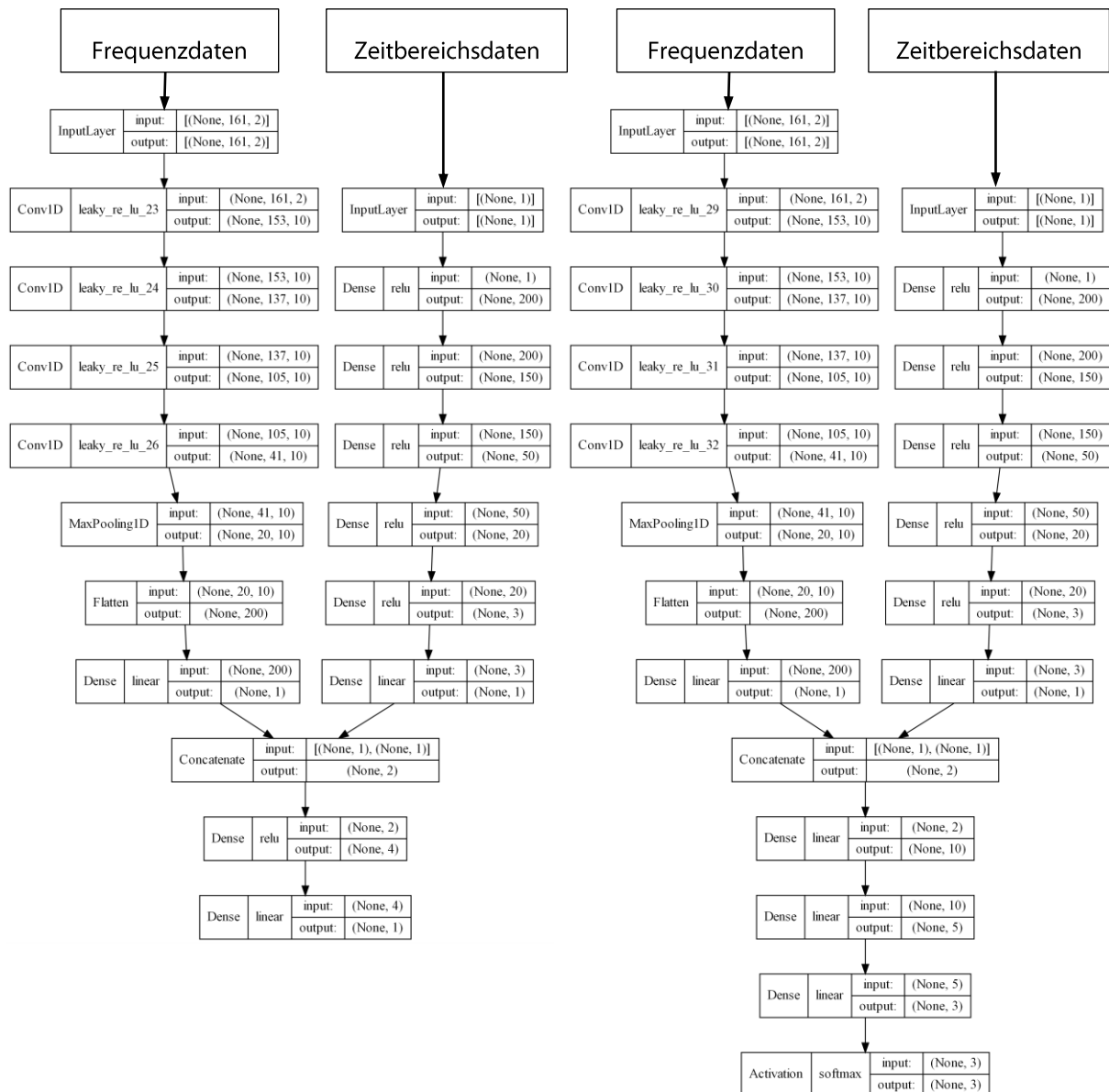


Abbildung 57: Links: Struktur des Neuronales Netzes zur Feuchtigkeitsvorhersage. Rechts: Neuronales Netz zur Salzvorsage. „Conv1D“ Schichten sind eindimensionale Faltungsnetze zur Verarbeitung von vektoriellen Frequenzdaten. „Dense“ Schichten verarbeiten hauptsächlich skalare Daten aus dem Zeitbereich. Rectified Linear Unit (ReLU) bzw. „leaky“ ReLU als Aktivierungsfunktion der Neuronen.

Üblicherweise müssen Datensätze, welche durch einen Machine Learning Algorithmus verarbeitet werden, vorverarbeitet werden. Entsprechend wurden die Frequenzdaten mit einem „Standard-Scaler“, welche eine Normalverteilung der Daten erzwingt, und die Nullstellendaten mit einem „MinMax-Scaler“, welcher den maximalen Wertebereich transformiert, umgeformt. Die Information der Datensätze mit bekanntem Salzgehalt wurde mit einem Label- sowie OneHot-Encoder in die festgelegten Salzkategorien: „keine/geringe Salzlast“, „mittlere Salzlast“ und „hohe Salzlast“ eingeteilt.

Die Neuronalen Netze wurden mit Daten aus den Einzelsteinstudien sowie aus den Messungen an den Mauerwerksprüfkörpern durch Verknüpfung mit den zugehörigen Feuchtwerten trainiert. Da zu jeder Radarmessung stets ein Feuchtigkeitswert vorhanden ist, wird dieses Vorgehen auch als „supervised learning“ bezeichnet und ist die Voraussetzung für das Generieren eines Regressionsmodells. Dieses erste, kleinere Modell mit circa 600 Datensätzen wurde nachfolgend genutzt, um die zugehörige Feuchtigkeit zu den projektbegleitenden Messungen an den Mauerwerkskörpern, jedoch ohne vorliegende gravimetrische Untersuchung, vorherzusagen. Der hierdurch gewonnene, deutlich vergrößerte Datensatz mit mehr als 12000 Messungen wurde für ein weiteres Training genutzt, um das finale Modell zu generieren. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „semi-supervised“ learning verwendet. Der Vorteil der hier angewandten Technik liegt explizit in der Erhöhung der Robustheit des Modells durch einen vergrößerten, vielfältigen Datensatz. Machine learning Modelle und insbesondere Neuronale Netze zeichnen sich durch sogenannte Hyperparameter aus, welche während des Trainings vom Anwender gesetzt werden müssen. Beispiele wären hierfür die Anzahl der Netzschichten, Neuronenzahl pro Schicht, verwendete Optimierungsfunktionen oder die Anzahl an Trainingsschritten. Die Wahl der Hyperparameter beeinflusst maßgeblich die endgültige Performanz des trainierten Modells, weshalb eine Optimierung dieser notwendig ist. Typischerweise werden Techniken wie „grid search“ verwendet, um einen Testplan an vorgegebenen (Hyper-)Parameterwerten abzuarbeiten. Hierfür wird für jede Kombination an Parameterwerten ein Modell trainiert und dessen Vorhersagegenauigkeit an einem Validierungsset an Daten getestet. Eine nachfolgende statistische Auswertung erlaubt die Ermittlung des besten Modells mit dem Set an zugehörigen Hyperparametern. Mit entsprechend leistungsstarker Hardware konnten 10000 Modelle trainiert und evaluiert werden. In Abbildung 58 sind die Einflussfaktoren der einzelnen Hyperparameter auf das Resultat der Validierung aufgetragen. Die Vorhersage der finalen Modelle zur Feuchtigkeitsbestimmung in Sandstein und Ziegel am entsprechenden Validierungsset kann in Abbildung 59 eingesehen werden.

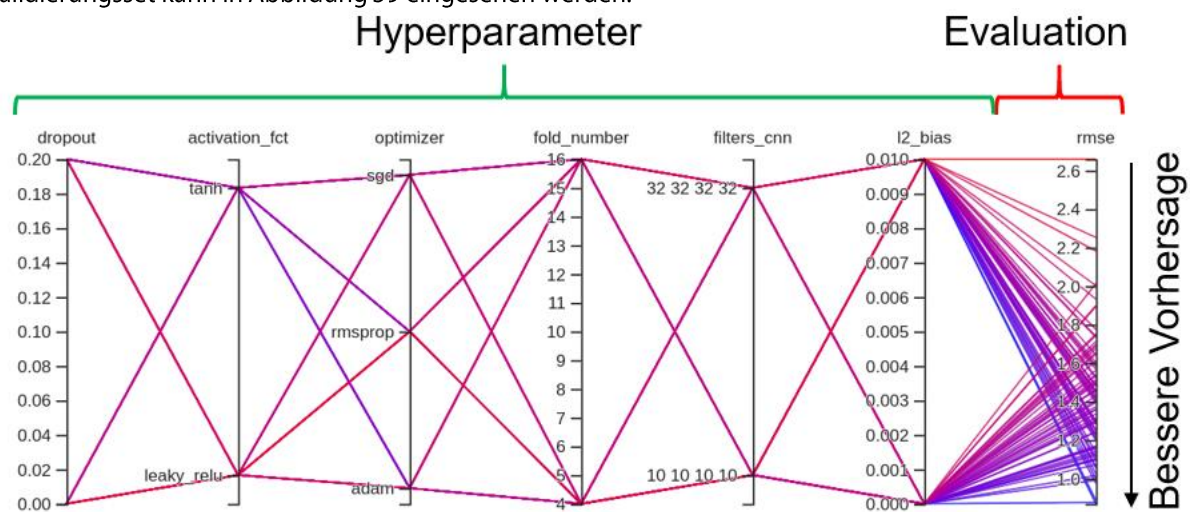
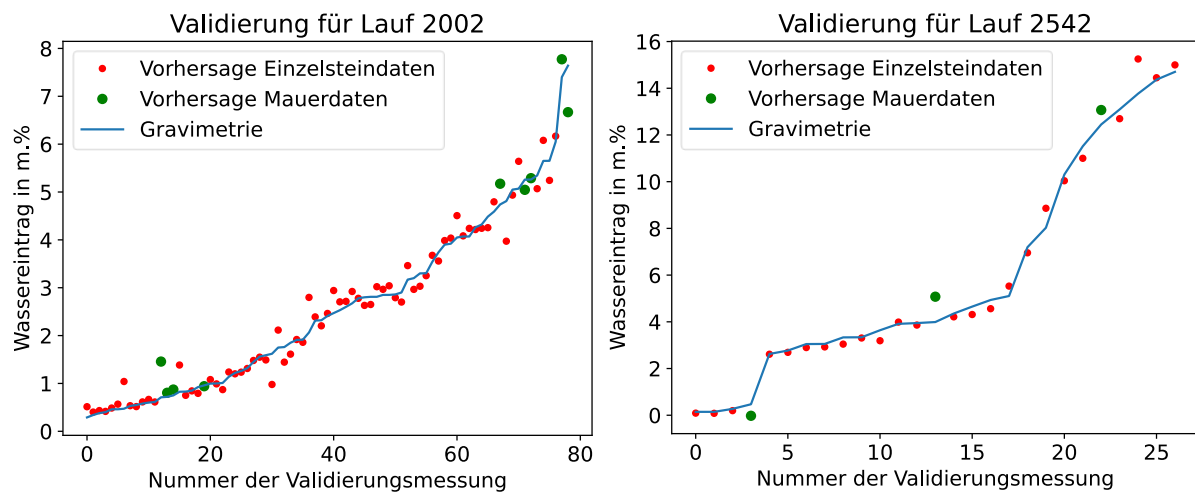


Abbildung 58: Visualisierung eines Grid Search Verfahrens. Eine Vielzahl Neuronaler Netze wird aus verschiedenen Kombinationen aus Hyperparametern erstellt und an einem Testdatensatz getestet. Das Modell mit der besten Performanz wird als finales Analysemodell im Projekt verwendet. Als Evaluationsgröße dient der Root mean squared error (RMSE) der Abweichung von der Vorhersage zum tatsächlichen Feuchtigkeitswert des Testdatensatzes (mit Darr Methode ermittelt). Als Hyperparameter wurden neben der Anzahl an Netzschichten und der Neuronenanzahl pro Schicht auch verschiedene Aktivierungsfunktionen der Neuronen, Optimierer, Kernelgrößen der Faltungsschichten sowie Regularisierungsgrößen wie die L2-Ridge Regression oder Dropout-Schichten (letzttere verhindern Overfitting des Modells) ausgewählt.



Ergebnisse

Wie schon beschrieben wurden unterschiedlichste Messungen an verschiedenen Prüfkörpern variierender Größe und Art durchgeführt. Somit gliedert sich der Ergebnisteil in folgende Punkte:

- Einzelsteine: Erlangen Grundverständnis der Messtechnik, Test der Auswertverfahren, Trainieren des KI-Modells
- Mauerwerksprüfkörper: Anwendung der Methodik auf komplexere Systeme, größer angelegte konzertierte Messkampagne
- Reale Objekte: Validierung und Grenzen des Systems unter realen Bedingungen aus der Baupraxis

Messergebnisse der Einzelsteine

Im Vorfeld und über den kompletten Projektablauf begleitend wurden verschiedenste Studien an Einzelsteinen (sowohl Ziegelstein als auch Sandstein) durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt.

In Abbildung 60 auf der linken Seite sind die Parameterwerte des Realteils für eine Studie an Ziegelsteinen dargestellt. Dabei wurde jeweils ein Teil der Steine in deionisiertem Wasser (im Diagramm schwarz) als Referenz und der andere Teil in einer Salzlösung (im Diagramm rot) bis zur vollständigen Sättigung gelagert. Für die Studie wurde eine NaCl-Lösung verwendet, wobei deren Konzentration so eingestellt wurde, dass bei vollständiger Sättigung des Ziegelsteins ein Chloridgehalt von 0,1 M-% in Bezug auf den ofentrockenen Ziegel vorhanden ist. Der Parameter stellt hierbei einen Mittelwert der Realteilkurve über den Spitzenfrequenzbereich der jeweiligen Messung dar (siehe Abbildung 53 links).

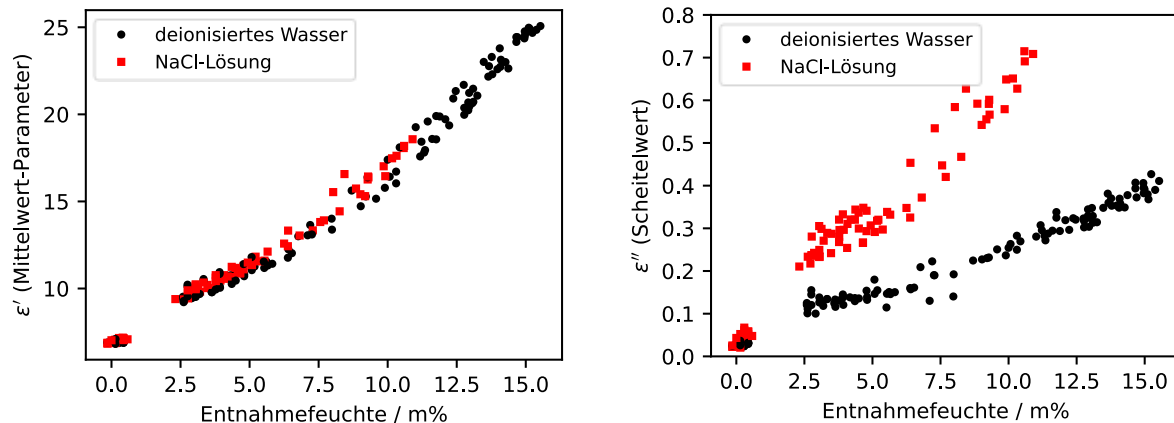


Abbildung 60: Links: Modellparameter des Realteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Ziegel zeigen keine Abweichung gegenüber den salzfreien Ziegeln. Rechts: Modellparameter des Imaginärteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Ziegel zeigen einen deutlich höheren Imaginärteil (entspricht einer höheren Dämpfung der Radarwelle) als die salzfreien Ziegel.

Es ist deutlich erkennbar, dass kein Trend des Realteils der Permittivität der salzkontaminierten Ziegel in Bezug auf jene der Kontrollgruppe beobachtet werden kann. Anzumerken ist der Umstand, dass die Datenpunkte der salzbelasteten Ziegel nur bis zu einer Feuchtigkeit von circa 11 M-% aufgetragen sind, was einem Durchfeuchtungsgrad von etwa 73 % entspricht. Für höhere Sättigungswerte waren die dämpfenden Eigenschaften des Wassers in Verbindung mit den gelösten Ionen des Salzes zu hoch, um für die untersuchte Ziegellänge von 240 mm ein auswertbares Signal aufnehmen zu können. Da die Ziegel ohne Salzbelastung in diesem Bereich allerdings verwertbare Ergebnisse aufzeigen, lässt bereits die Information, kein Signal zu erhalten auf ein Vorliegen einer erhöhten Salzmenge schließen.

Ein Parameter welcher, dem Verlauf des Imaginärteils der Permittivität entnommen wurde (siehe hierzu Abbildung 53 rechts) und eine Aussage über den Absolutwert bei sich verschiebenden Frequenzen zulässt, ist in Abbildung 60 (rechtes Bild) über den prozentualen Wassergehalt aufgetragen.

Im Gegensatz zu den Informationen aus dem Realteil ist hier ein deutlicher Trend zu höheren Absolutwerten des Imaginärteils der Permittivität bei salzbehandelten Ziegelsteinen im Vergleich zur Kontrollgruppe zu erkennen. Der sich mit zunehmender Feuchtigkeit vergrößernde Abstand beider Gruppen fügt sich gut in das theoretische Verständnis ein, wonach bei höherer Feuchtigkeit eine größere Menge an Salz in Lösung und damit eine höhere Anzahl an freien Ionen vorliegt. Letztendlich ist die Menge an „Ladungsträgern“ (Dipol des Wassers + freie Ionen) im Baustoff-Wasser-Salz-Gemisch für die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen ausschlaggebend, welche maßgeblich den Verlauf des Imaginärteils der Permittivität vorgibt.

Aufgrund des entsprechend hohen Frequenzbereiches der Messung spielt das Vorhandensein von Salzen im Gefüge keinen Einfluss auf den Realteil-Parameterwert und erlaubt somit eine salzunabhängige Feuchtermittlung über die untersuchte Mauerbreite. Unter Berücksichtigung des Imaginärteil-Parameters kann zusätzlich eine Aussage bezüglich gelöster Salze getroffen werden. Inwiefern sich diese quantifizieren oder unterscheiden lassen, ist Gegenstand des folgenden Kapitels. Abschließend ist anzumerken, dass die Information zum Real- wie Imaginärteil der Permittivität immer zeitgleich mit einer einzelnen Messung vorliegen.

Versuchsreihe zur Kategorisierung / Quantifizierung von Salzen

Für die Vorhersage bauschädlich relevanter Salze in den Mauerwerken ist ein grundlegendes Verständnis deren feuchtigkeits- und frequenzabhängigen Verhaltens notwendig. In erster Instanz wurde ermittelt, inwiefern verschiedene Arten von Salzen bei konstanter Molzahl bezogen auf das Trockengewicht eines Probekörpers (Moldichte) im Messergebnis in Erscheinung treten. Speziell wurden NaCl, MgSO₄ sowie KNO₃ aufgrund deren bauschädlichen Relevanz sowie Verfügbarkeit untersucht.

Für die Studie wurden einzelne Sandsteinblöcke aus Sander Schilfsandstein in zwei Gruppen eingeteilt. Über eine Einstellung zweier Moldichten je nach Gruppe von 0,02 mol/kg bzw. 0,012 mol/kg wurde von jedem der drei Salzarten entsprechend ein Lösungsansatz hergestellt.

Die Evaluation der Messergebnisse hatte aufgezeigt, dass einwertige Anionen wie Chlorid und Nitrat ähnliche Werte im Imaginärteilparameter aufweisen (Dämpfung des Signals), hingegen liegen Werte der Lösungen mit zweiwertigen Anionen wie bei der MgSO₄ Lösung stets darunter (geringere Dämpfung des Signals). Dies ist bei beiden Gruppen, die in Abbildung 61 grafisch dargestellt sind zu erkennen.

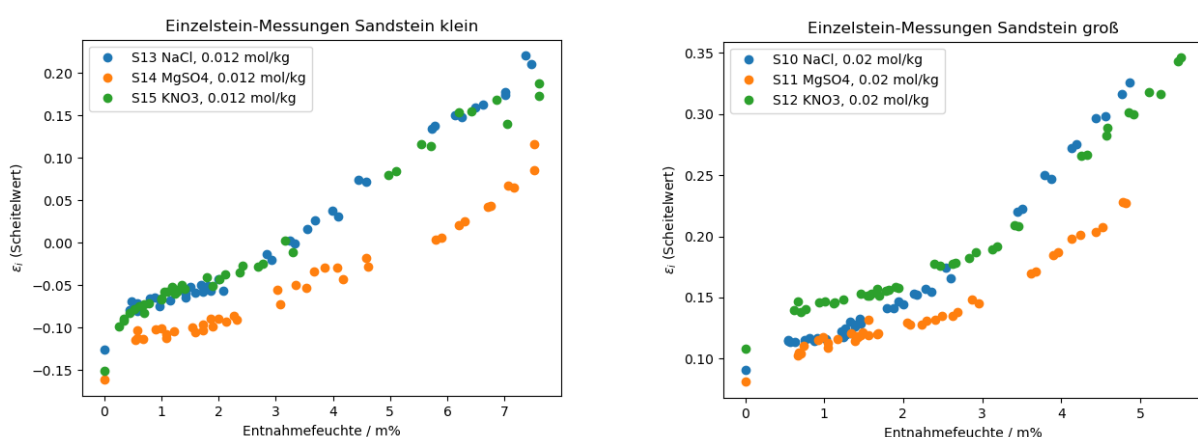


Abbildung 61: linke Seite: Einfluss unterschiedlicher Salzarten auf die Radarmessung bei konstanter Moldichte von 0,012 mol/kg. Sandsteingröße in cm: 25 x 15 x 15

rechte Seite: Einfluss unterschiedlicher Salzarten auf die Radarmessung bei konstanter Moldichte von 0,02 mol/kg. Sandsteingröße in

cm: 30 x 15 x 25

Die unterschiedlichen Steingrößen resultieren daraus, dass Restbestände aus dem Aufbau der Mauerwerke hergenommen wurden.

Es hat sich gezeigt, dass aufgrund des verschiedenen Einflusses auf das Messergebnis in Abhängigkeit der Wertigkeit der Ionen, keine quantitative Aussage über die absolute Stoffmenge an Ionen möglich ist. An einem realen Bauwerk mit unbekannter Menge und Art an beinhalteten Salzen kann insbesondere bei einer Mischung von Salzen verschiedener Wertigkeit auch keine Unterscheidung der verschiedenen Salzarten erfolgen.

Anhand einer weiteren Studie zur Detektierbarkeit von Salzen wurde untersucht, inwiefern zumindest eine qualitative Aussage über den Belastungsgrad eines Mauerwerks mit Salzen getroffen werden kann. Hierbei wurden wieder Sandsteinblöcke zuerst mit deionisiertem Wasser als Referenz und später mit Salzlösungen mit NaCl, MgSO₄ und KNO₃ behandelt und der Trocknungsprozess mit fortwährendem Wiegen sowie Radarmessungen begleitet. Die Auswirkungen der Salze auf den Imaginärteil-Parameter der Permittivität sind in Abbildung 62 aufgetragen. Wie in vorherigen Untersuchungen liegen die Parameterwerte der salzbelasteten Studien in der Regel über jenen der Referenzstudie mit destilliertem Wasser. In dieser Studie wurden unterschiedliche Moldichten für die verschiedenen Salzarten gewählt, sodass für die Proben mit NaCl gleich 0,028 mol/kg, MgSO₄ gleich 0,016 mol/kg und KNO₃ gleich 0,01 mol/kg aufwiesen. Bezogen auf das Trockengewicht der Sandsteine ergeben die Lösungen bei einer vollständigen Sättigung eine Konzentration von 0,1 M-%. Analog zur vorherigen Studie hat sich gezeigt, dass die zweiwertigen SO₄- Ionen trotz höherer Moldichte als die einwertigen NO₃- Ionen, niedrigere Imaginärteil-Werte liefern. Durch Einfügen von, aktuell beliebig gewählten, Trenngeraden können die verschiedenen Studien aber in grobe Klassen: „A: keine/geringe Salzlast“, „B: mittlere Salzlast“ und „C: hohe Salzlast“, wie in Abbildung 62 dargestellt, unterteilt werden. Diese Klassen sind übereinstimmend mit den Belastungsstufen aus der Literatur gemäß Abbildung 30.

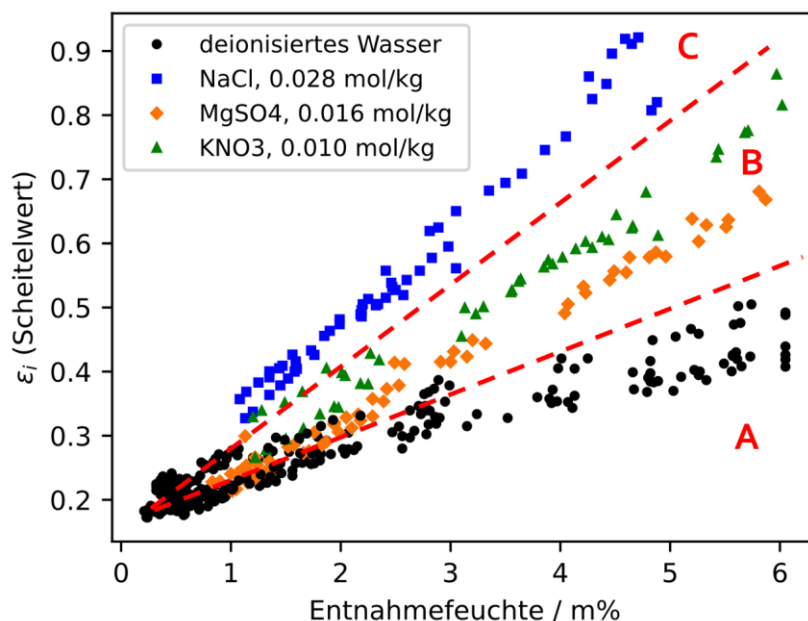


Abbildung 62: Einteilung der Salzwirkung in qualitative Klassen. In dem Diagramm sind die Ergebnisse der Sandsteinblöcke dargestellt.

Wie auch an der Studie mit Ziegelsteinen und NaCl-Lösung beobachtet, verhalten sich alle drei Salze im Realteil-Parameter der Permittivität unauffällig im Vergleich zur Referenz mit deionisiertem Wasser. Vergleiche hierzu Abbildung 63.

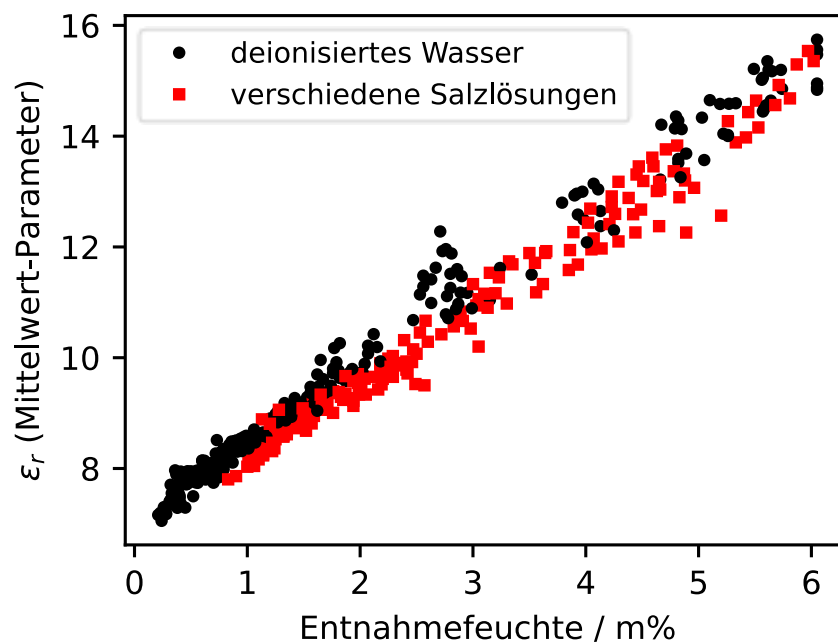


Abbildung 63: Modellparameter des Realteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Sandsteine zeigen keine signifikante Abweichung gegenüber den salzfreien Sandsteinen.

Durch das Einteilen von durchgeführten Studien in die drei Salzklassen und Übergabe dieser Information an ein Neuronales Netz während des Trainings ist es möglich auch für unbekannten Studien eine qualitative Vorhersage bezüglich der Salzmenge zu erzielen.

Exemplarisch dafür ist in Abbildung 64 der Trocknungsverlauf eines Sandsteinblockes mit Radarmessungen und gravimetrischen Untersuchungen begleitet worden. Zur Präparation wurde der Probekörper bis zur Sättigung in eine MgSO_4 -Lösung gelegt, sodass sich eine mittlere Mol-dichte an Anionen von 0.016 mol/kg eingestellt hatte. Dies entspricht einer innerhalb dieses Projektes als „mittel“ eingestuften Salzlast. Ersichtlich ist, dass die Machine Learning Vorhersage der Salzlast über die Messungen oberhalb einer Feuchtigkeit von 1.5 M-% diesbezüglich korrekt ist. Unterhalb dieses Schwellwertes gibt die Vorhersage aber größtenteils „kein Salz“ aus. Hier ist anzunehmen, dass durch den fortschreitenden Austrocknungsvorgang ein Großteil der freien Ionen sich wieder zu elektrisch neutralen Salzkristallen ausbildet haben und daher messtechnisch mit dem Radarverfahren nicht mehr zu detektieren sind.

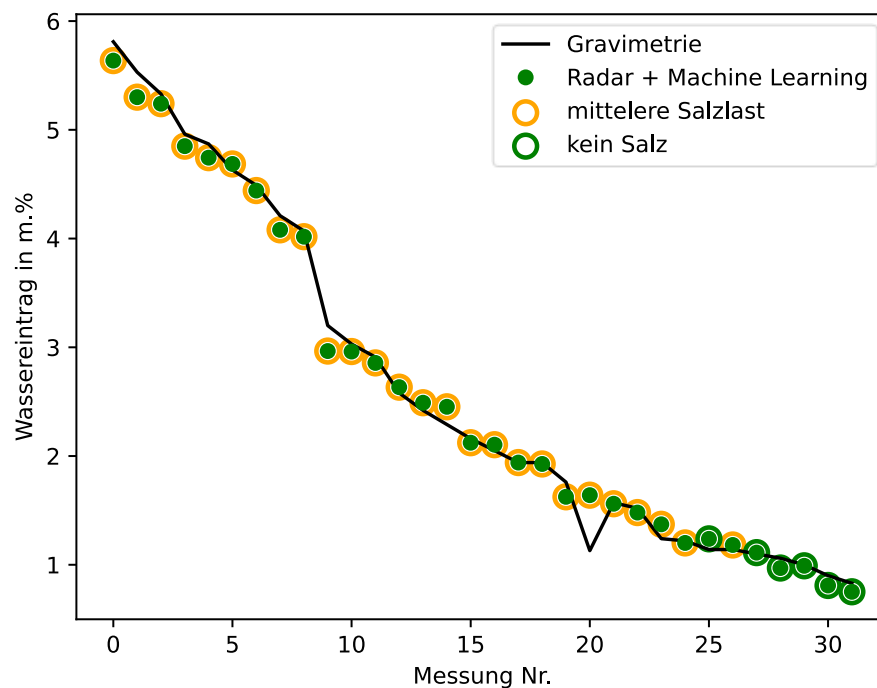


Abbildung 64: Messreihe an einem exemplarischen Sandsteinblock (40 cm x 25 cm x 20 cm) welcher mit MgSO_4 -Lösung versetzt wurde (kategorisiert als mittlere Salzlast). Die Ringe um die Datenpunkte der Radarergebnisse geben die Vorhersage bezüglich der Salzlast an.

Messergebnisse der Mauwerksprüfkörper

Ergebnisse Gravimetrie

Im Vorfeld einer Bohrmehlentnahme wurden die Ziegelmauern immer wieder mit einer entsprechenden Waage gewogen (siehe Tabelle 8). Dabei schwanken die ermittelten „Startgewichte“ der Ziegelmauern nur leicht zwischen 242,2 kg und 244,3 kg. Es sei hier angemerkt, dass das Gewicht der Gitterroste (~4,1 kg), auf denen die Mauern transportiert werden in der Wägung enthalten sind. Im Vergleich dazu ergab das errechnete Gewicht mit einer Fugenbreite von 1cm und einer Dichte von 1710 kg/m^3 für den Mörtel und 1840 kg/m^3 für den Ziegel einen Wert von **241,73 kg**. Das niedrigste Gewicht von **242,2 kg** wurde am 02.05.2022 für die Ziegelmauer in der grauen Wanne (ZG) ermittelt, welches das niedrigste gemessene Gewicht – und wie sich bei den Ergebnissen der Gravimetrie herausstellt, auch das trockenste – von allen Ziegelprobekörpern darstellt. Mit einem maximal messbaren Gewicht von 300kg waren die Sandsteinmauern für die Waage zu schwer und konnten somit nicht gewogen werden.

Tabelle 8: Gewichte der einzelnen Ziegelsteinmauern vor bzw. nach einem Wässerungszyklus. Das Gewicht der Ziegelmauern liegt dabei zwischen 242 kg und 244 kg. Insgesamt wurde von den Mauern zwischen 7 und 10 kg Wasser aufgenommen. Die Ziegelmauer in der orangenen Wanne ZO stellt mit einer Wasseraufnahme von 27,68 kg einen Spezialfall dar, da diese Mauer sowohl von oben als auch von unten bewässert wurde und somit deutlich mehr Wasser aufgenommen hat.

	ZB	ZO	ZG	ZR
„Startgewicht“ jeweils vor dem ersten Wässern	244,1kg	243,8kg	242,2kg	244,3kg
Gewicht nach dem ersten Wässern	251,94kg	271,48kg (wurde von oben und von unten bewässert)	252,32kg	fehlgeschlagen

Insgesamte Wasseraufnahme	7,84kg	27,68kg (wurde von oben und von unten bewässert)	10,12kg	-
„Startgewicht“ vor dem zweiten Wässern	243,6kg	246,53kg	„Startgewicht“ erstes Wässern ¹ : 242,2kg	-
Gewicht nach dem zweiten Wässern	251,57kg	253,83kg	253,49kg	-
Insgesamte Wasseraufnahme	7,97kg	7,3kg	11,29	-

Zum Zeitpunkt der ersten Wägung stand die Ziegelmauer in der grauen Wanne, (ZG) etwa sechs Monate am endgültigen Standort und wurde noch für keinen Wässerungszyklus hergenommen. Auch die Ergebnisse der Gravimetrie zeigen, dass die Mauer zu diesem Zeitpunkt sehr trocken war und Entnahmefeuchten von deutlich unter 1 M-% aufweist (siehe Abbildung 65). Eine erneute Wägung nach dem Wässern am 07.06.2022 ergab ein Gewicht von **252,32 kg**. Somit hat die Ziegelwand über insgesamt 36 Tage etwa **10,12 kg** an Wasser aufgenommen.

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse der gravimetrischen Entnahmefeuchten nach dem ersten Wässerungszyklus der grauen Mauern dargestellt. Gut zu sehen ist, dass bei der Ziegelmauer (oberen drei Diagramme) nur in der ersten Höhenstufe (bei etwa 12cm) ein deutlicher Feuchteanstieg zu verzeichnen ist. Über das Integral hat der beprobte Ziegel etwa 17,54 M-% Wasser aufgenommen. Die ermittelten Entnahmefeuchten der darüber liegenden Höhenstufen liegen weiterhin bei unter 1 M-%. Mit Hilfe dieser Entnahmefeuchten kann, unter Ausschluss des Fugenmörtels ein Wert für den absoluten Wassereintrag berechnet werden. Angenommen wird, dass bei der Ziegelmauer nur die ersten zwei Ziegellagen tatsächlich Wasser gezogen haben. Dafür werden die Durchschnittswerte der Entnahmefeuchten der verschiedenen Höhenstufen repräsentativ für die jeweilige Ziegellage, aus der sie entnommen wurden und der darunterliegenden Ziegellage hergenommen. Über das Ziegelformat (in diesem Fall Normalformat) und der gemessenen Dichte kann somit das Gewicht der Ziegel für den jeweils betrachteten Abschnitt bestimmt werden und mit der Entnahmefeuchte in Bezug gesetzt werden. Somit ergibt sich ein errechneter Wassergehalt von **10,4 kg**.

Bei den Sandsteinmauern (Abbildung 65, unteren drei Diagramme) dagegen ist bis in die dritte Höhenstufe (44 cm) ein Feuchtestieg zu sehen. Die tatsächliche Wasseraufnahme der Sandsteinmauern ist nicht bekannt, da die Prüfkörper für die verwendete Waage zu schwer waren. Da immer wieder zur gleichen Füllhöhe nachgefüllt wurde, konnte über die Bestimmung des „Wasserverbrauchs“ ausgerechnet werden, dass von der Sandsteinmauer in den 36 Tagen der Wässerung etwa 12 kg Wasser aufgenommen wurde. Der Wasserverlust über Verdunstung wurde hierbei nicht berücksichtigt, da sich die Prüfkörper in einem Keller mit relativ konstanten Klimabedingungen (~ 18 °C und 60 %rel-F) befinden und sich die Verluste über Verdunstung somit auf ein Minimum beschränken. Wie bei den Ziegelsteinen kann über die ermittelten Entnahmefeuchten ebenfalls ein Wert für den absoluten Wassergehalt in der Sandsteinmauer berechnet werden. Da hier pro Reihe eine Beprobung stattfand wurde der Durchschnittswert der Entnahmefeuchten repräsentativ für die entsprechenden Sandsteine hergenommen. Über das Format der Sandsteine und der ermittelten Dichte kann wieder das Gewicht der Sandsteine im betrachteten Bereich in Bezug auf die Entnahmefeuchte gesetzt werden. Hier ergibt sich ein Wert von **10,7 kg** für den kompletten Wassergehalt in der Sandsteinmauer. Auch hier wurde der Fugenmörtel nicht berücksichtigt.

¹ Vor dem zweiten Wässern wurde die Ziegelmauer grau (ZG) nicht gewogen, da zu dem Zeitpunkt die Waage defekt war und es noch keinen Ersatz gab, weswegen das „Startgewicht“ der ersten Wiegung hergenommen wurde.

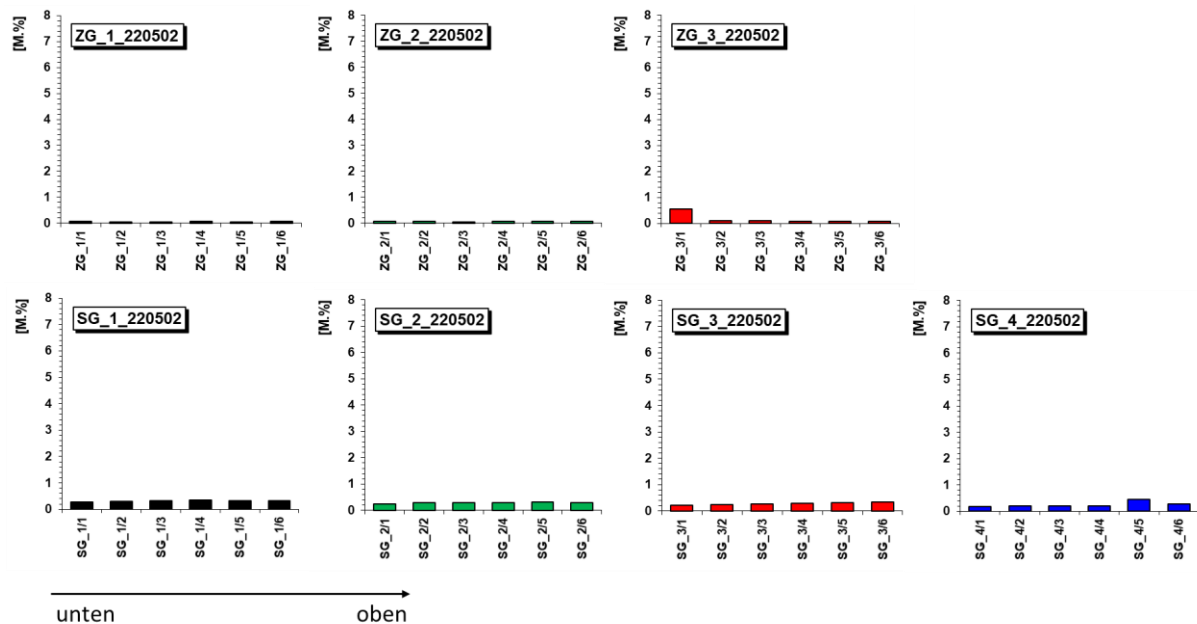


Abbildung 65: Ergebnis der gravimetrischen Feuchtemessung (graue Profilwanne). Zum Zeitpunkt der Probenentnahme stand dieses Mauerwerkspaar etwa 6 Monate im Inneren zusammen mit den übrigen Prüfkörpern. Der Farbcode als auch die Beschriftung der Diagramme beschreibt jeweils die Höhenstufe, aus welche die Proben entnommen wurde. Die sechs Säulen innerhalb eines Diagramms repräsentieren dabei die einzelnen Tiefenstufen in 2 cm Schritten von 0 – 12 cm.

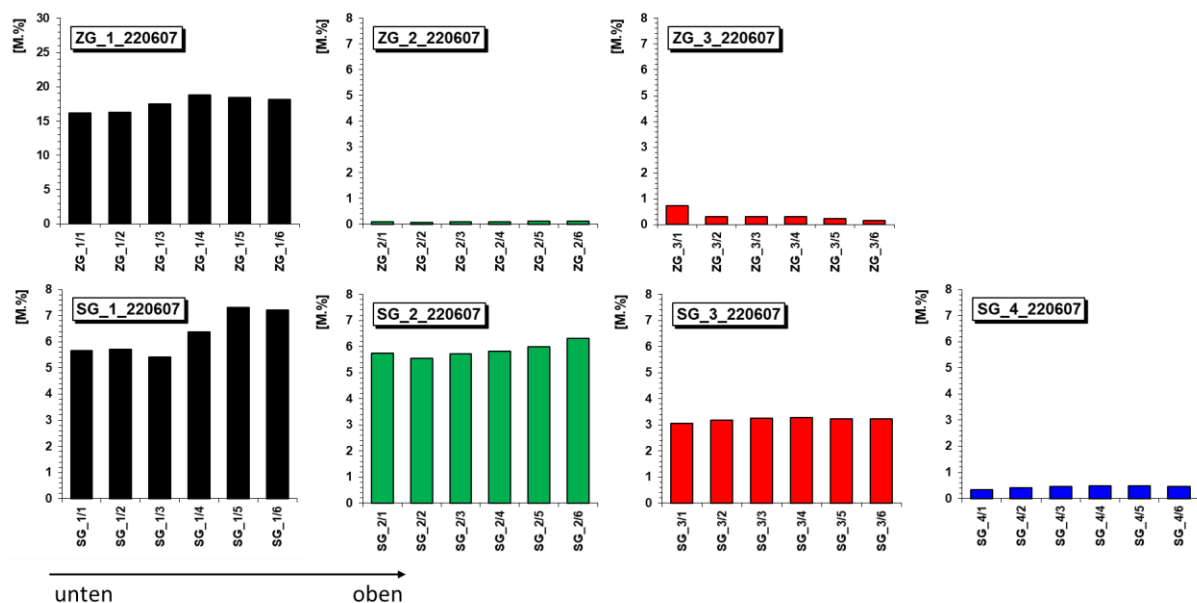


Abbildung 66: Ergebnis der gravimetrischen Feuchtemessung (graue Profilwanne) nach 36 Tagen Wässerung.

Ergebnisse Radarmessungen

Die Auswertung der Radarmessungen erfolgte entsprechend der Erfahrungen mit den Einzelsteinen (vgl. Abbildung 60). Es wurde jeweils der Absolutwert des Realanteils der Permittivität mit dem konstanten Modell ermittelt. Da an den Mauerwerken die Sättigung nicht über eine Waage bestimmt werden kann, sind die Messdaten über die Trocknungszeit aufgetragen.

Die ersten drei Messpunkte (T) in Abbildung 67 kennzeichnen den trockenen Zustand der Sandsteinmauer in der blauen Profilwanne (gemessen 29.11.21). Die exponentiell sinkenden Werte des Realteils der Permittivität stellen den erwarteten Trocknungsprozess der Mauer dar. Die Messreihe „oben“, welche 19 cm von der oberen

Mauerkante entfernt ist, hat einen geringeren Startwert, also einen geringeren Feuchtegehalt, was den parallel durchgeführten Widerstandsmessungen entspricht (vgl. Abbildung 51). Alle drei Messkurven streben asymptotisch gegen Messpunkt (T), welcher jedoch aufgrund des andauernden Trocknungsprozesses noch nicht erreicht wurde. Der „mitte“-Messpunkt (35 cm von der oberen Mauerkante) trocknet gerade zu Beginn etwas schneller als der „unten“-Messpunkt (50 cm von der oberen Mauerkante). Dies lässt sich wahrscheinlich über das Absinken des Wassers nach unten erklären.

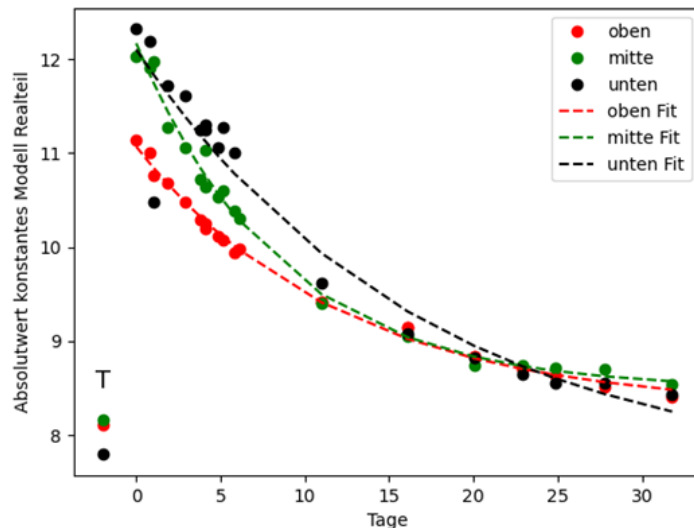


Abbildung 67: Trocknungsprozess der Sandsteinmauer in der blauen Wanne, überwacht mit dem Radargerät. Erster Messpunkt (T) ist eine Messung der Mauer im Trockenzustand. Die Farben der Höhenstufen entsprechen dem Farbcode, der im Kapitel Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes festgelegt wurde.

Die dargestellten Messergebnisse entsprechen dem erwarteten Trocknungsverlauf in der Mauer, was eine erste Bestätigung des Messprinzips bedeutet. Im nächsten Schritt werden die Vorhersagen zur Feuchte im Mauerwerk der Radarmessungen mit den Ergebnissen der Gravimetrie abgeglichen, um die Auswertung weiter qualifizieren zu können.

Hierfür wurden über einen Zeitraum von etwa drei Wochen ein Mauerwerkspaar insgesamt vier Mal beprobt, um den Trocknungsverlauf darzustellen. Im Falle der Sandsteinmauer, die hier betrachtet wird, ergeben sich somit insgesamt 16 Messpositionen die aus den zu Beginn des Projekts festgelegten Höhenstufen entnommen wurden (siehe Abbildung 68). Pro Messaktion wurde an den vier Höhenstufen jeweils Punktmessungen mit dem Radargerät durchgeführt und direkt im Anschluss an den entsprechenden Stellen Bohrmehle entnommen. In Abbildung 69 sind die Ergebnisse für beide Messmethoden dargestellt. Hier ist gut zu sehen, dass in den ersten beiden Messaktionen, die Radarmessung gut mit den Ergebnissen der Gravimetrie übereinstimmt. Die Radarmessungen in den letzten zwei Messaktionen tendieren dagegen zu deutlich höheren Feuchtwerten (siehe Messpunkt 10). Eine mögliche Erklärung liegt in der erhöhten Anzahl an sehr feuchten und sehr trockenen Feuchtigkeitszuständen im Trainingsdatensatz des Machine Learning Modells begründet. Dies bedingt eine geringere Performanz im mittleren Feuchtigkeitsbereich.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 68: Sandsteinmauer mit den insgesamt 16 Messpositionen aus vier Probenahmeaktionen, die den Trocknungsverlauf über etwa drei Wochen darstellen sollen.

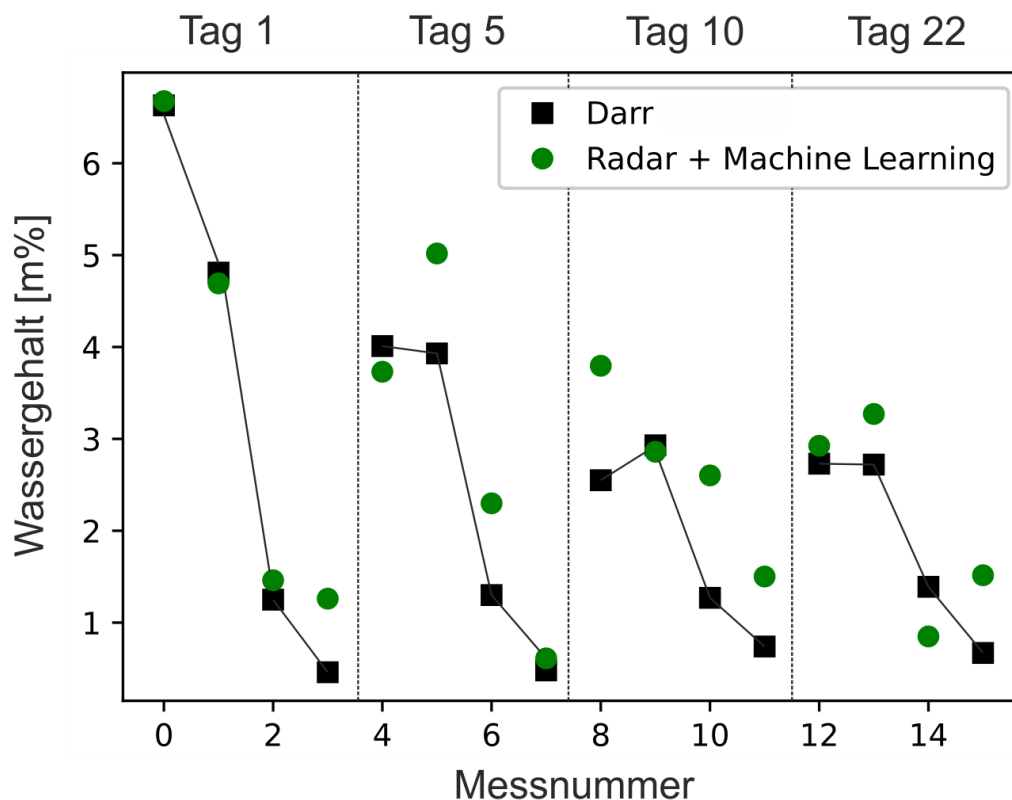


Abbildung 69: Vergleich der Entnahmefeuchten der Gravimetrie (schwarze Linie) mit den Ergebnissen der Radarmessungen (grüne Punkte). Gravimetrie und Radarmessungen stimmen in den ersten zwei Probenahmeaktionen gut überein. Bei den darauffolgenden Messungen tendieren die Radarmessung eher zu höheren Feuchtegehalten.

Messergebnisse der konzertierten Messkampagnen

In insgesamt zwei größer angelegten Bohraktionen wurden das Radarmesssystem und die Auswertung mit Hilfe des Neuronalen Netzes validiert.

Neben der Bestimmung der absoluten Feuchte über die Gravimetrie und der Vermessung mit der Radarsonde wurden auch weitere, indirekte Messverfahren angewendet. Als kapazitive Messmethode kam die Gann-Hydromette von Trotec (T650) zum Einsatz. Eine weitere Messung wurde über den elektrischen Widerstand gemessen über die Oberfläche mit dem Gerät T500 ebenfalls von Trotec durchgeführt. Als weiteres dielektrisches Messverfahren kam das Gerät Moist 250 von der Firma HF Sensor zum Einsatz. Zur Verfügung standen bei diesem Gerät zwei unterschiedliche Messköpfe, die unterschiedliche Eindringtiefen besitzen. Der kleine Messkopf mit der Bezeichnung Moist R1M ist ein Strahlungs-Applikator mit einer Eindringtiefe von bis zu 4 cm. Ein weiterer Strahlungs-Applikator mit der Bezeichnung Moist PM erreicht Eindringtiefen von 20 bis zu 30 cm.

Aufgrund der vielen Messpunkte, die mit unterschiedlichsten Messmethoden vermessen wurden, ist eine große und dichte Datenmenge zusammengetragen worden.

Um aus den Daten eine grafische Darstellung zu generieren wurde das Programm MoistAnalyse der Firma HF Sensor verwendet. Hier lassen sich nicht nur Daten aus dem Mikrowellenmessgerät exportieren, sondern auch eigens generierte Daten einlesen und entsprechend bearbeiten.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 70) sind die Ergebnisse der gravimetrischen Auswertung der ersten Bohraktion im Vergleich zu der mit Hilfe der KI ausgewerteten Radarmessung zusammengefasst. Die Skalen in allen Abbildungen sind dabei in Masseprozent [M-%] und für gleiche Mauerwerkstypen identisch skaliert. Es ist gut zu sehen, dass die Saughöhe des Wassers in den Radarmessungen sehr gut abgebildet wurde. Auch die Feuchtwerte sind gut miteinander vergleichbar, wobei die Radarmessungen an den Ziegelmauern leicht trockenere Werte ergeben. Dagegen sind die gemessenen Feuchtwerte der Sandsteinmauern im Vergleich zu den Ergebnissen der Gravimetrie sehr ähnlich, was auch gut an dem sehr nassen Stein in der unteren linken Ecke zu sehen ist. Dieser wird ebenfalls genauso in der Radarmessung abgebildet. Es ist zu berücksichtigen, dass hier nicht das finale Regressionsmodell verwendet wurde und die Daten, mit denen das Modell trainiert wurde aus den hier vermessenen Materialien stammt.

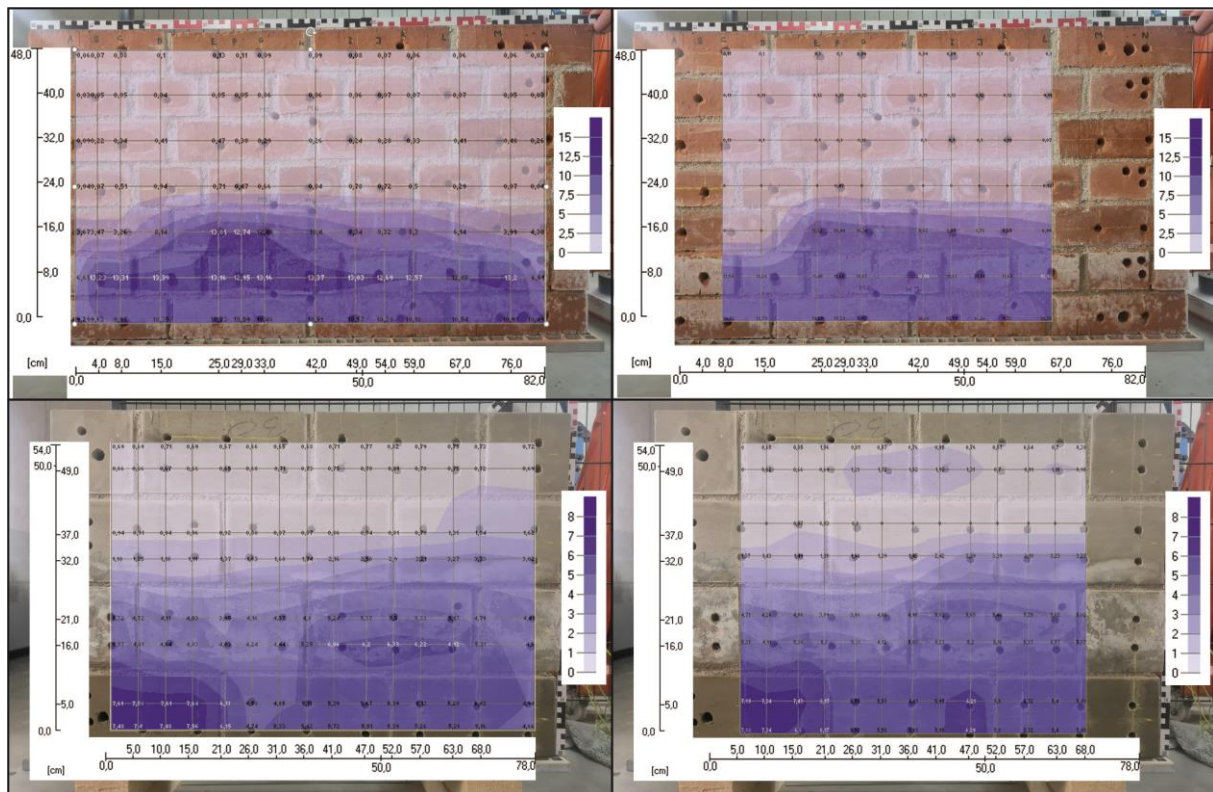


Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 70 Auswertung Gravimetrie der großen konzertierten Bohrung auf der linken Seite und mit den von der KI vorhergesagten Werte auf der rechten Seite. Die Werte der Skalen auf der rechten Seite geben die absolute Feuchte in M-% an. Da aufgrund von Streueffekten am Rand nicht alle Radarmessungen auswertbar waren, wurde die Auswertung auf ein kleineres Feld beschränkt.

In den Diagrammen in Abbildung 71 sind die Ergebnisse der Entnahmefeuchten als Varianzdiagramm dargestellt. Die grauen Balken stellen jeweils die durch die Gravimetrie ermittelten Entnahmefeuchten dar mit den entsprechenden Werten an der Basis des Balkens. Die anderen Farben stellen die Differenz zwischen der gravimetrisch bestimmten Entnahmefeuchte und den durch die Radarmessung ermittelten Werten dar. Eine positive Differenz zwischen beiden Entnahmefeuchten (Gravimetrie > Radar) werden in Grün dargestellt, eine negative Differenz (Gravimetrie < Radar) entsprechend in Rot. Die Beträge der einzelnen Differenzen sind über den dazugehörigen Balken mit einem Richtungspfeil (nach oben positiv, nach unten negativ) aufgeführt.

Für die Werte der Ziegelmauer wurde zwischen der Gravimetrie und der Radarmessung ein mittlerer Fehler von 0,55 M-% bei einer Standardabweichung von $\pm 0,84$ ermittelt. Der Vergleich der Messungen an den Sandsteinmauern ergab einen mittleren Fehler von 0,41 M-% mit einer Standardabweichung von $\pm 0,4$.

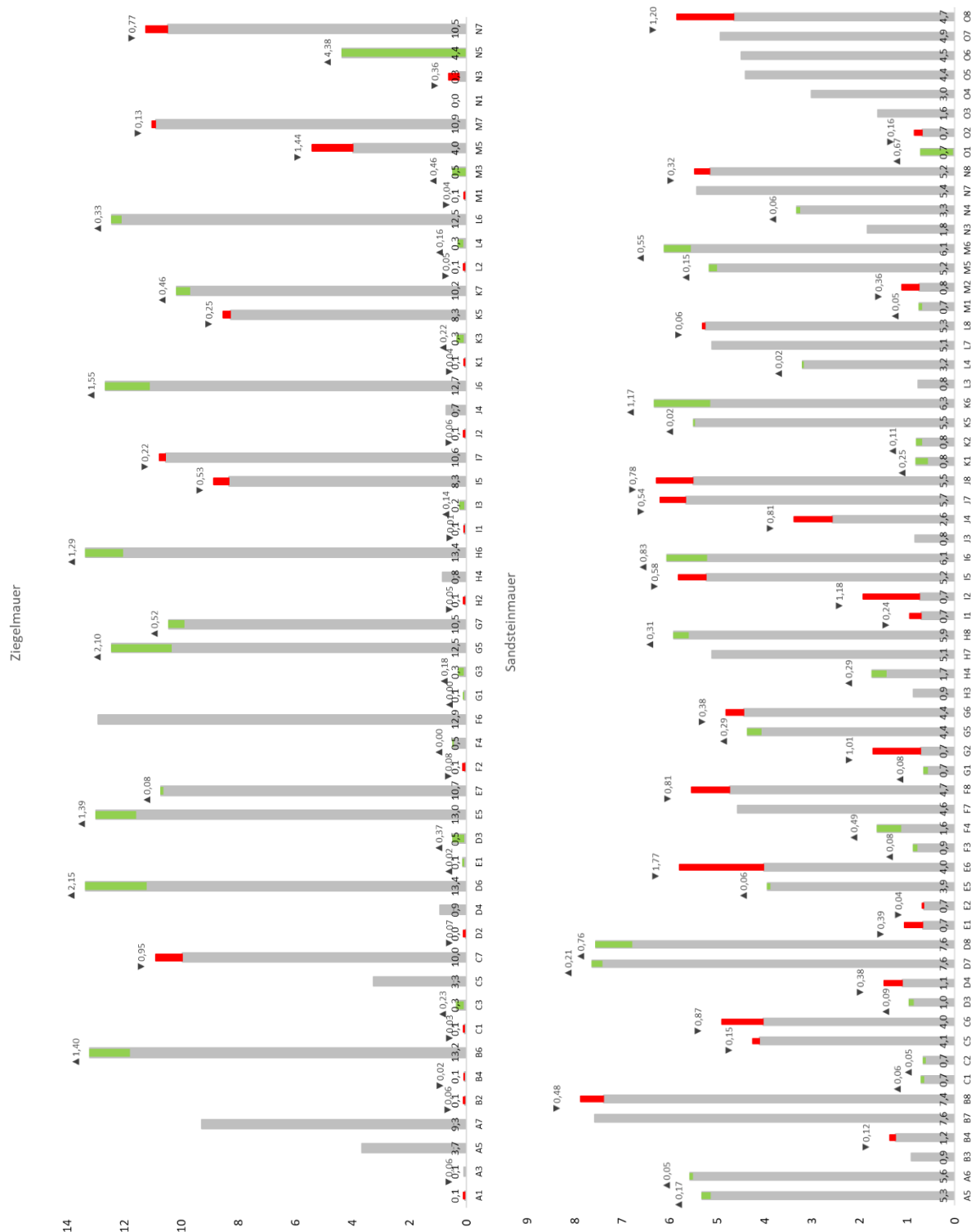


Abbildung 71: Darstellung der Differenzen zwischen der gravimetrisch ermittelten Entnahmefeuchten (graue Balken) und den Radarmessungen aller Messpunkte der entsprechenden Mauerwerkstypen in einem Varianzdiagramm. Rot stellen jeweils eine negative Differenz und grün eine positive Differenz dar. Über den jeweiligen Balken ist der Betrag der Differenz mit einem Richtungspfeil aufgeführt. An manchen Balken konnte keine Differenz berechnet werden, da hier kein auswertbares Signal über Radar gemessen werden konnte.

Anzumerken ist, während die Entnahme der Bohrmehlproben mit anschließender Wägung und Auswertung etwa drei Tage in Anspruch genommen hat, waren die Messungen mit der Radarsonde an beiden Mauerwerken in wenigen Stunden durchgeführt.

In einer zweiten kleineren Bohraktion wurden die Mauern nun zusätzlich auch noch von oben gewässert. Wie schon beschreiben wurde das Messfeld und die Probenahme- bzw. Messpunkte aufgrund von Zeitgründen nochmals stark reduziert. In Abbildung 72 sind auf der linken Seite wieder die Ergebnisse der Gravimetrie und auf der rechten Seite die ermittelten Werte der Radarmessungen dargestellt. Für die Auswertung hier wurde nun das finale Regressionsmodell mit einem großen Datensatz verwendet. Die Ziegel nehmen teilweise etwas mehr Wasser auf, als die Probe, die im Labor vermessen wurde. Eine gewisse Abweichung in den Kennwerten ist bei Baumaterialien wie auch bei Natursteinen normal. Deswegen wurde die Skala bei den Ziegelmauern entsprechend auf 18 M-% erhöht. Ansonsten sind die Skalen wie in der vorangegangenen Auswertung gleich und jeweils für die entsprechenden Mauerwerkstypen identisch.

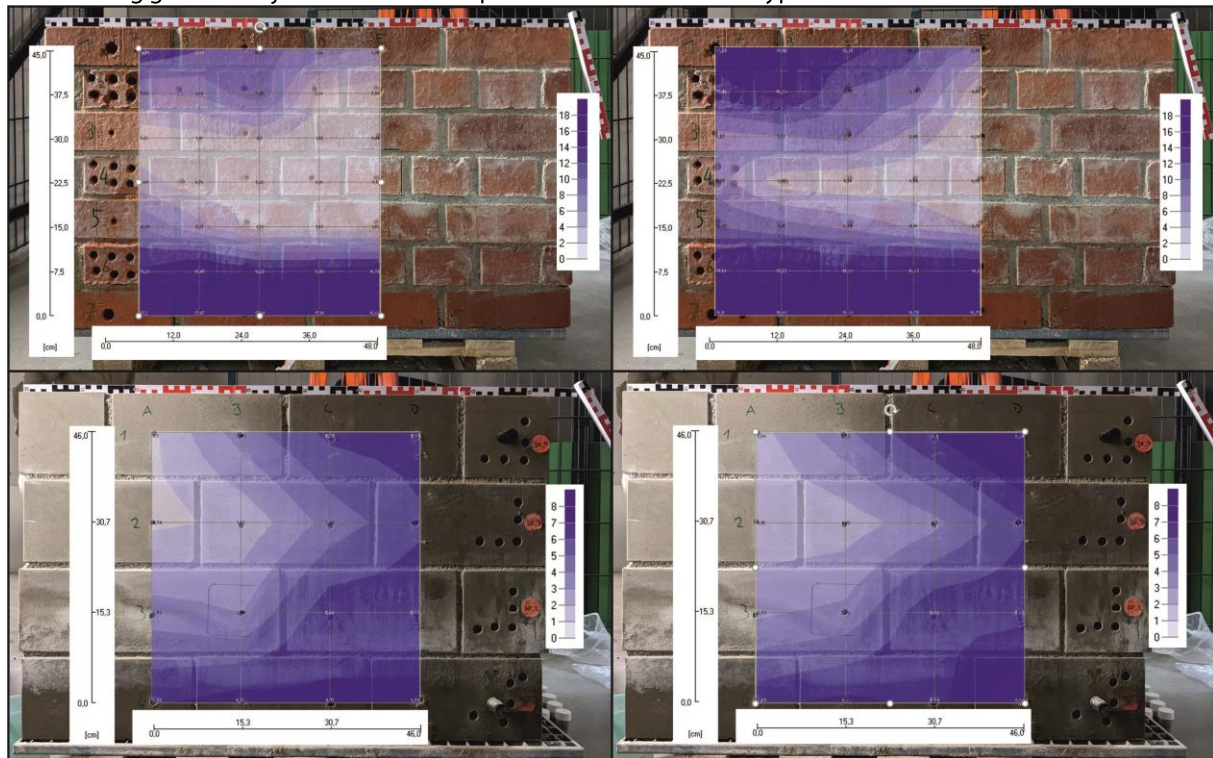


Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 72: Auswertung Gravimetrie der kleinen, konzertierten Bohraktion. Jeweils die zwei linken Bilder zeigen die Ergebnisse der gravimetrischen Feuchteermittlung. Die zwei rechten Bilder stellen die Ergebnisse der Radarmessung dar.

Vor allem die Feuchtehorizonte werden durch die Radarmessung wieder sehr gut wiedergegeben. Die ermittelten Feuchtwerte der Radarmessung tendieren allerdings bei der Ziegelmauer im oberen linken, feuchten Bereich zu höheren Werten. Auch bei der Sandsteinmauer geht der Trend der Radardaten zu höheren Entnahmefeuchten.

In den beiden Varianzdiagrammen in Abbildung 73 ist wieder die Differenz zwischen den Feuchtwerten aus dem Darr-Verfahren und den Radarmessungen dargestellt. Hier fällt auf, dass überwiegend an der Ziegelmauer, die durch Radar ermittelten Werte sehr viel höher sind, als die äquivalent dazu gemessenen Werte der gravimetrischen Feuchteauswertung.

Bei dieser Bohraktion ist der mittlere Fehler zwischen der gravimetrisch ermittelten Entnahmefeuchte und der durch die Radarmessungen mit 1,97 M-% deutlich höher als in der ersten. Die Standardabweichung ist hier mit $\pm 2,49$ ebenfalls hoch. Dagegen fällt der Fehler an der Sandsteinmauer mit 0,65 M-% bei einer Standardabweichung von $\pm 0,72$ deutlich besser aus.

Mit der Radarmessung wäre eine noch genauere Auflösung möglich, da hier die B-Scans und somit theoretisch alle Punkte auf der Messgeraden zur Verfügung stehen würden.

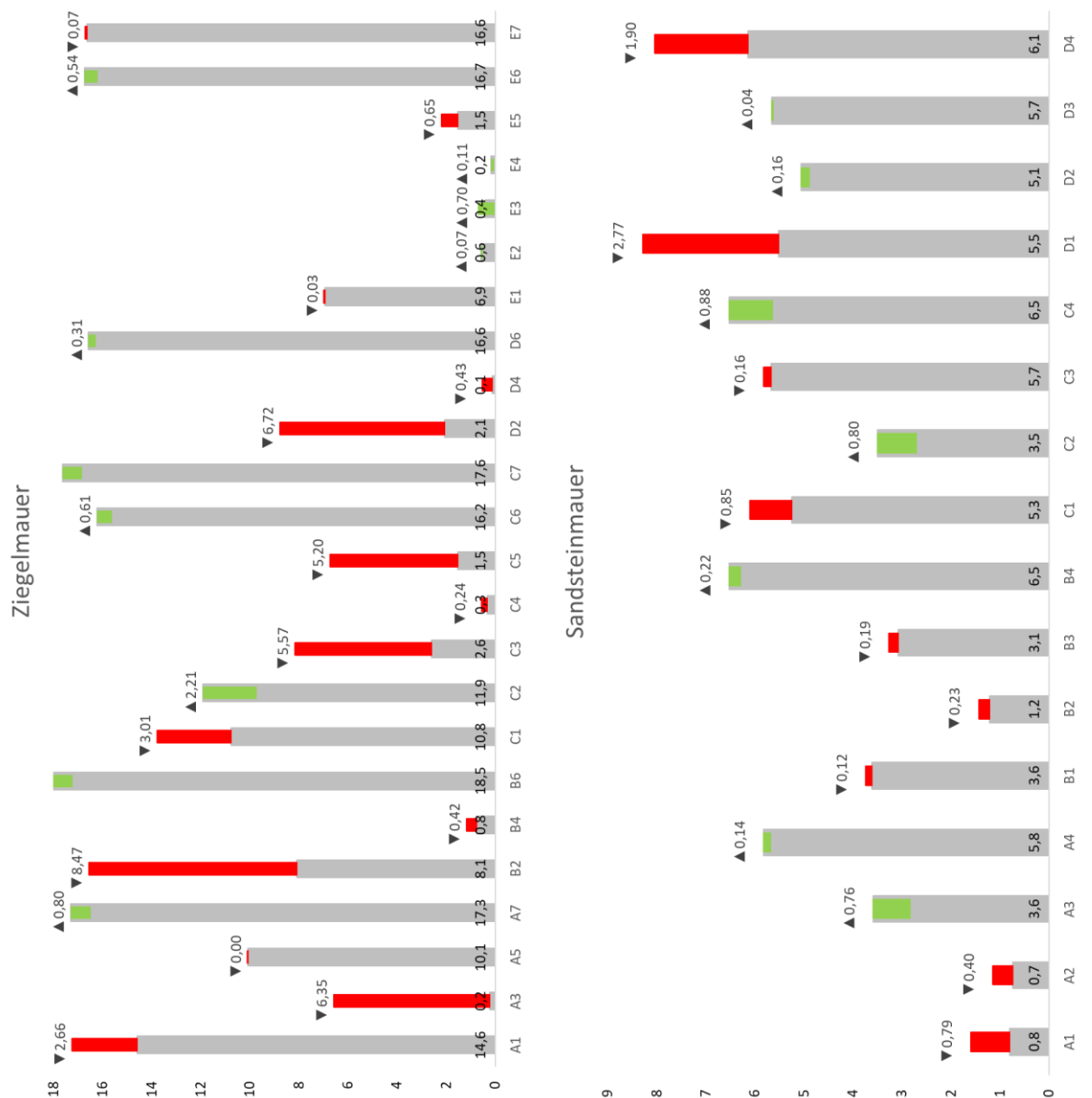


Abbildung 73: Varianzdiagramm der zweiten Bohraktion. Darstellung identisch Abbildung 71.

[Vergleich mit anderen, indirekten Messmethoden](#)

In Abbildung 74 und Abbildung 75 sind die Messwerte der unterschiedlichen indirekten Messverfahren am Beispiel der ersten konzentrierten Messaktion grafisch gegenüber gestellt. Die Skalen auf der rechten Seite sind in [digits] bzw. einem dimensionslosen Feuchtigkeitsindexwert. Dieser wird unter anderem bei den Mikrowellenmessungen hergenommen, um daraus einen entsprechenden Feuchtwert über interne Referenzkurven zu unterschiedlichen Materialien zu berechnen. Sowohl bei den Ziegelmauern als auch bei den Sandsteinmauern liefert die Messung per Mikrowelle die besten Ergebnisse, was die flächige Verteilung der Feuchte angeht. Auch die Hydromette und die Widerstandsmessung über die Oberfläche geben ungefähr den Feuchtehorizont wieder.

Verteilung und Verlauf der Feuchte werden mit diesen Messmethoden gut gezeigt und nasse Bereiche können von trockenen unterschieden werden. Für jedes Messinstrument wird jedoch bei gleicher Feuchte ein jeweils anders skaliertes Feuchteindexwert generiert. Unterhalb der Messinstrumente lassen sich die Werte nicht vergleichen. Die Ergebnisse sind somit nur bedingt brauchbar und können nur vergleichend innerhalb eines Mauerwerks hergenommen werden. Somit lassen sich nur erschwerte mögliche Maßnahmen ableiten.

Abweichungen zur Darr-Methode sind nicht bestimmbar, da diese Produkte keinen absoluten Feuchtigkeitswert, sondern nur einen bezugslosen Index ausgeben.

Das Radarverfahren liefert hingegen denselben Informationsgehalt wie das Darr-Verfahren und ist von der Praxistauglichkeit ähnlich mit jener der verfügbaren kommerziellen Produkte anzusehen.

Eine Optimierung bestehender Messgeräte mit einem Machine Learning Modell wäre grundsätzlich umsetzbar und könnte unter speziellen Bedingungen (sehr dünne Wände, keine Salze) ähnliche Ergebnisse liefern. Leider haben alle diese kommerziellen Produkte eine deutlich geringere Eindringtiefe als ein GPR Radar (meist nur wenige Zentimeter). Die meisten Messverfahren können aufgrund des genutzten Messeffektes darüber hinaus den Einfluss der Salze nicht vom eingetragenen Wasser trennen. Eine salzunabhängige Feuchtigkeitsbestimmung wäre auch mit KI-Unterstützung daher nicht möglich. Es gibt Mikrowellensensoren welche bei einzelnen Frequenzen arbeiten aber diese verfügen nicht über die Eindringtiefe und den Informationsgehalt eines breitbandigen Radarsignals.

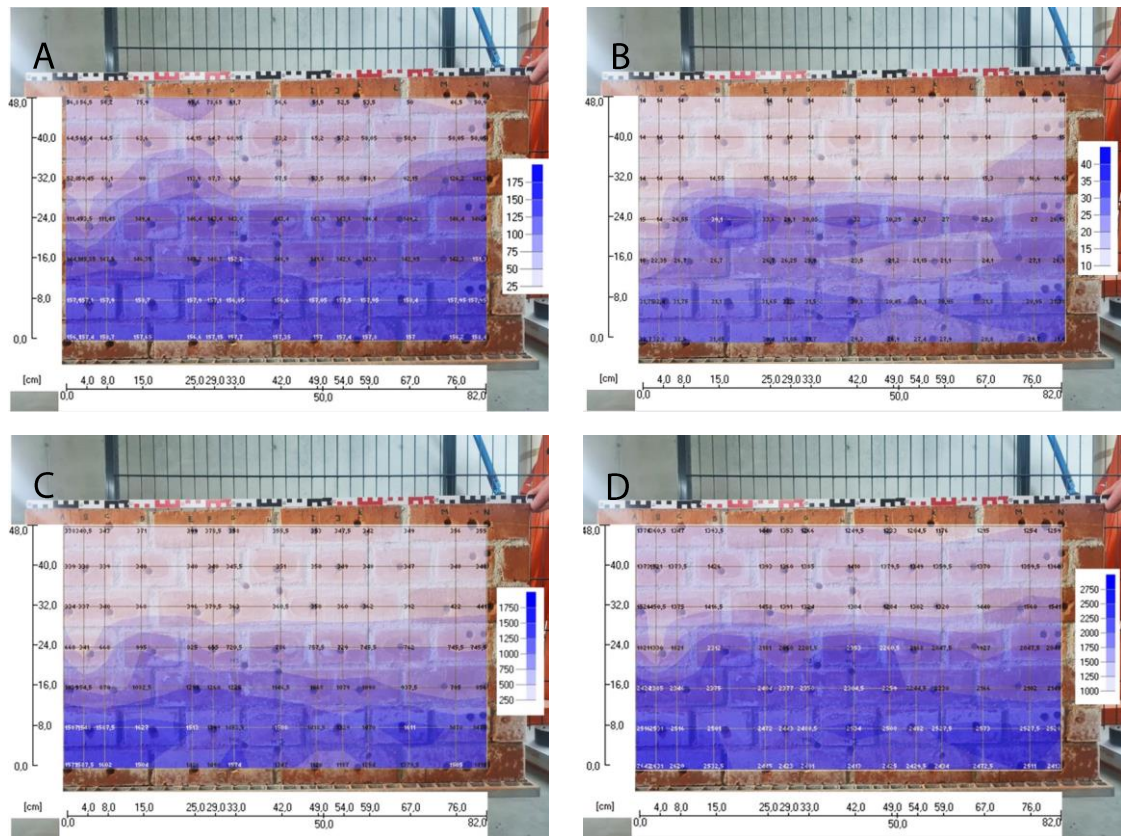


Abbildung 74: Vergleich unterschiedlicher indirekter Messmethoden untereinander. A) Gann-Hydromette, B) elektrischer Widerstand über die Oberfläche, C) kleiner Mikrowellen-Messkopf, D) großer Mikrowellen-Messkopf

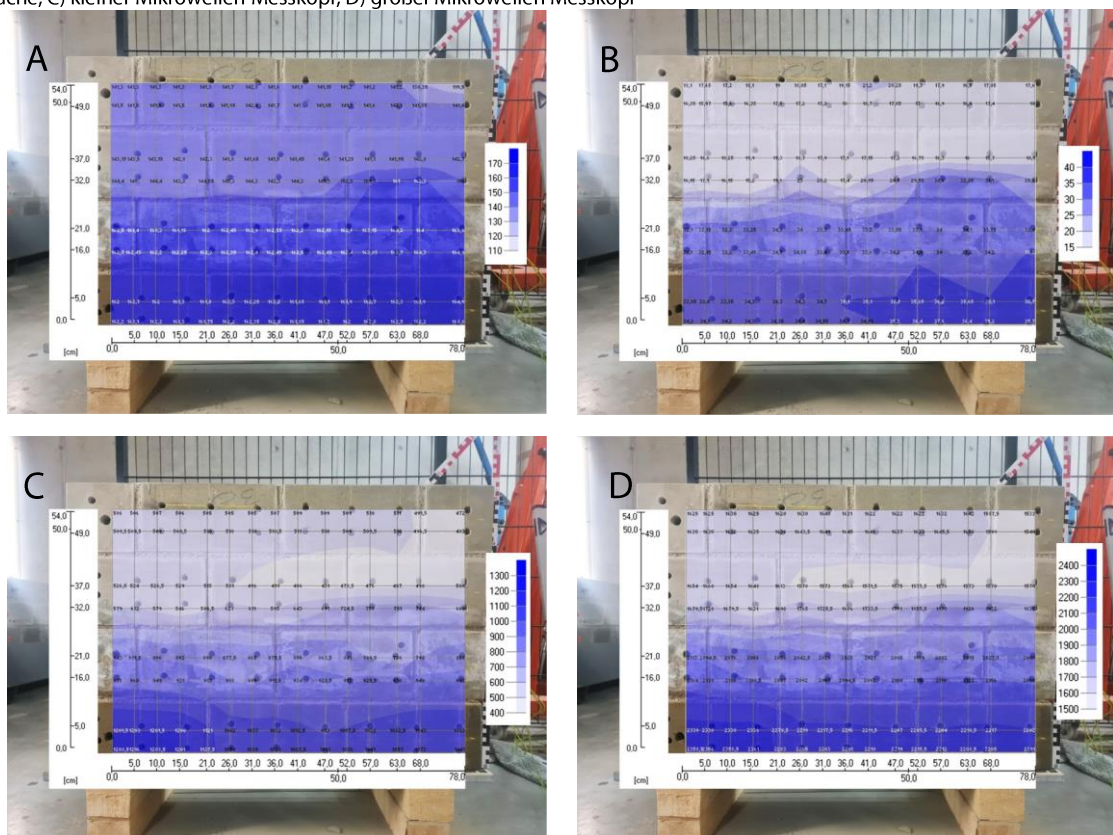


Abbildung 75: Vergleich unterschiedlicher indirekter Messmethoden untereinander. A) Gann-Hydromette, B) elektrischer Widerstand über die Oberfläche, C) kleiner Mikrowellen-Messkopf, D) großer Mikrowellen-Messkopf

Messergebnisse an realen Objekten

Durch den Einsatz in der Baupraxis an realen Objekten und auf richtigen Baustellen zeigen sich deutlich die Stärken und Schwächen des Gerätes und des Messsystems. Im Gegensatz zu den Bedingungen im Labor sind die Baustoffe hier weitestgehend unbekannt. Somit lässt sich das mit den Daten aus den Labormessungen trainierte KI-Modell sehr gut überprüfen und validieren.

Die Handhabung erwies sich als sehr benutzerfreundlich und es lassen sich sehr schnell einzelne Punkte und Profile aufnehmen. Somit ist man in einem Höhenprofil nicht nur auf wenige Punkte, wie es bei der Entnahme von Bohrmehlproben / Bohrkernen der Fall ist, beschränkt, sondern es kann theoretisch jeder beliebige Punkt der Messstrecke ausgewertet werden. Außerdem können die Messungen beliebig oft wiederholt werden, da das Gerät nur auf die Oberfläche aufgesetzt wird und kein Probenmaterial entnommen werden muss.

Unebene Oberflächen ließen sich dagegen nur erschwert vermessen, da ein guter Kontakt des Messkopfes zum Untergrund vorhanden sein muss. Zudem sollten wenige grundlegende Informationen zum vorherrschenden Mauerwerk wie etwa Stärke und Materialität (Ziegelstein oder Sandstein) bekannt sein.

Da die Mauerwerksstärken des Staatsarchives und der Grundschule St. Johannis oft viel zu mächtig waren, konnten hier nur bedingt geeignete Radarsignale gemessen werden. Hier wurde versucht, über die Bohrkernentnahme mögliche Reflektionsebenen in Form von Materialübergängen wie z.B. von Ziegel zu Mörtel oder Füllung innerhalb des Mauerwerks ausfindig zu machen und diese dann mit den gemessenen Rückreflektionen zu korrelieren.

In der aktuellen Konfiguration können mit dem Radarverfahren nur Wandstärken bis circa 0.5 m Mächtigkeit untersucht werden. Für eine spätere praxistaugliche Anwendung an Bauten aus Naturstein bieten sich aber einige Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der verwendeten Hardware an. Da das verwendete, kommerzielle Radargerät hauptsächlich für Anwendungen entwickelt wurde bei denen der Fokus auf der Detektion von Bewehrungsstäben oder Fehlstellen in Beton liegt, verfügt dieses über eine relativ breite Richtcharakteristik. Der Einsatzzweck in diesem Vorhaben welcher eine möglichst hohe Eindringtiefe bedingt, würde durch eine schmale, fokussierte Abstrahlcharakteristik begünstigt werden. Im trivialen Fall würde auch eine erhöhte Sendeleistung eine höhere Eindringtiefe ins Mauerwerk bedeuten.



Foto: Daniel Frenzel

Abbildung 76: Bilder von Bohrkernen aus dem Staatsarchiv in Nürnberg: Oben: Entnommener Bohrkern aus einem Gewölbemauerwerk (einschalig, dahinter Füllung aus Lockermaterial); Unten: Entnommener Bohrkern aus einem Sandsteinmauerwerk. Der Bohransatz befindet sich dabei jeweils links.

In Abbildung 76 ist im oberen Bild ein Bohrkern aus einem Gewölbe, welches aus einer Ziegellage besteht zu sehen. Dabei hat der Ziegel eine Stärke von 16 cm, mit einer etwa 1 cm dicken Putzschicht auf der Oberfläche. Dahinter befindet sich eine Auffüllung aus Lockermaterial. Dabei stellt die Grenze zwischen dem Ziegel und dem Auffüllmaterial eine gute Reflexionsebene für die Radarwellen dar. Im Bohrkern, welcher im Bild darunter abgebildet ist, wurde über die gesamte Strecke von 75 cm nur Sandstein erbohrt. Durch das Fehlen einer geeigneten Reflexionsebene konnte an dieser Stelle kein auswertbares Radarsignal gemessen werden.

Im Folgenden sind Ergebnisse von ausgewählten Messpunkten der unterschiedlichen Kampagnen dargestellt. Die Auswahl erfolgte über das Kriterium, ein deutliches und auswertbares Radarsignal generiert zu haben. In Tabelle 9 sind Ergebnisse der gravimetrischen Entnahmefeuchte sowie des Durchfeuchtungsgrades zusammengestellt. Die Auswertung der Daten geschah nur mit Hilfe des final trainierten Neuronalen Netzes, wobei lediglich nur die Mächtigkeit der Mauer bzw. der zurückgelegten Strecke bis zur Reflexionsebene und um welches Material es sich handelt eingegeben werden musste. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 77 dargestellt.

Für alle durch Radar gemessenen ermittelten Entnahmefeuchten wurde wieder der mittlere Fehler mit entsprechender Standardabweichung in Bezug auf die durch Gravimetrie ermittelten Feuchtwerte bestimmt. Die Betrachtung des mittleren Fehlers ergab einen Wert von 1,22 M-%, den die Radarmessungen von den gravimetrischen Messungen abweichen, mit einer Standardabweichung von $\pm 0,61$.

Tabelle 9: Zusammenstellung der Ergebnisse der ausgewählten Messpunkte. Gravimetrie und Sättigungsfeuchte wurden jeweils direkt am entnommenen Material gemessen. Der Durchfeuchtungsgrad errechnet sich aus dem Anteil der Entnahmefeuchte von der Sättigungsfeuchte. Die zwei hellblau markierten Spalten sind jeweils die Entnahmefeuchten der unterschiedlichen Messmethoden in Masseprozent.

Probe Nr.	Länge		Material	Entnahme- feuchte durch Gravimetrie	Sättigungs- feuchte	Durchfeuchtung s-grad	Entnahme- feuchte durch Radarmessung
	Von	Bis		[m%]	[M-%]	[%]	[M-%]
Staatsarchiv							
BK_B_W_2	1 -	17	Ziegel	17,50	16,82	100	16,8
Grundschule St. Johanni							
BK04_k	2	10	Ziegel	10,53	15,13	10,53	11,93
Hohenpöhlz							
P1	0 -	13	Ziegel	3,99	17,56	22,7	6,04
P2	0 -	13	Ziegel	2,68	17,56	15,2	3,82
P3	0 -	13	Ziegel	0,41	17,56	2,3	1,37
P4	0 -	15	Ziegel verputzt	4,64	17,56	26,4	4,6
P5	0 -	15	Ziegel verputzt	4,48	17,56	25,5	6,32
P6	0 -	15	Ziegel verputzt	1,62	17,56	9,2	3,22

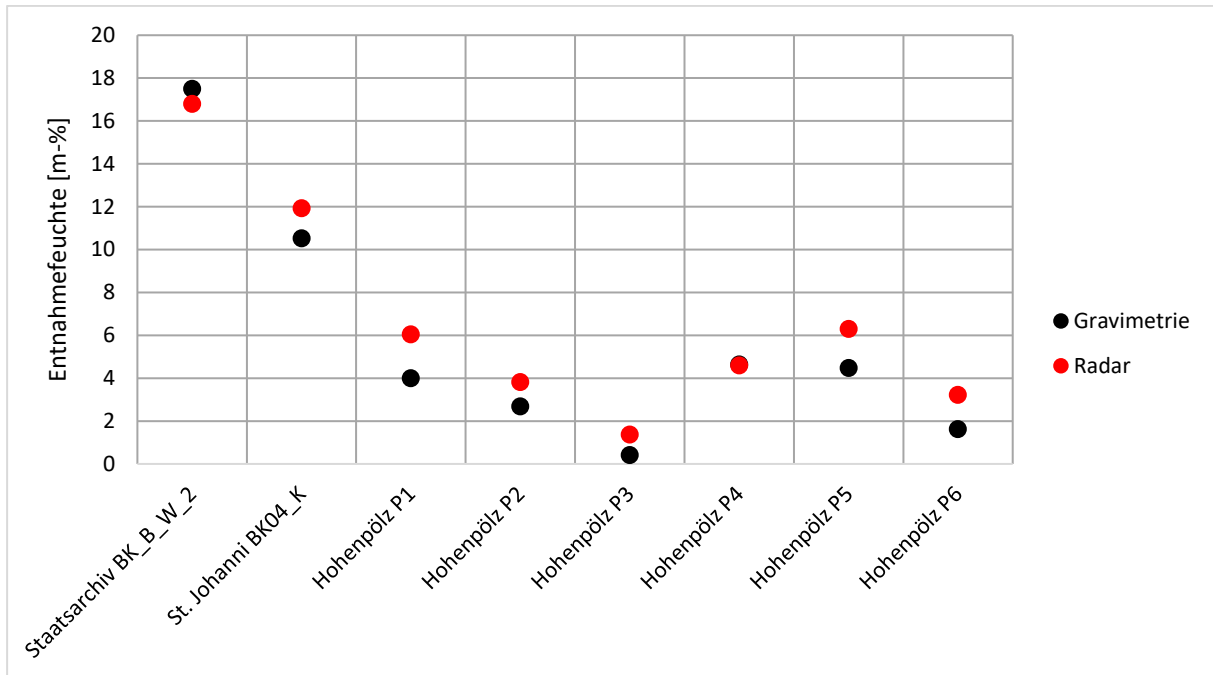


Abbildung 77: Grafische Darstellung der gravimetrisch ermittelten Feuchtedaten und den Vorhersagen aus den Radarmessungen, entsprechend den Werten in Tabelle 9 für die unterschiedlichen Objekte.

Zusammenfassung und Ausblick

Viele frühere Studien haben schon aufgezeigt, dass mit reflektierten elektromagnetischen Wellen eine Vielzahl an Informationen aus einem Mauerwerk bzw. Bauteil gewonnen werden können. Der Ansatz mit der Einbringung von Radarwellen über ein breites Frequenzspektrum in ein Mauerwerk wurde ebenfalls als sehr vielversprechend bewertet, doch scheiterte es bis dato an der zuverlässigen Auswertung der generierten Daten. Auch die Hardware, die Radarwellen über ein breites Frequenzband emittieren und auch wieder detektieren kann, war ein begrenzender Faktor.

Mit neuartigen GPR Modulen sind solche Messungen nun realisierbar. Die interne Hardwarekonfiguration des im Projekt verwendeten Radarmoduls ist allerdings dafür ausgelegt, Bewehrungsseisen in Stahlbeton sichtbar zu machen und möglichst genau zu lokalisieren. Dafür sollte der Beton weitestgehend trocken sein, da sonst keine brauchbaren Ergebnisse geliefert werden können. Auch die Positionen der Antennen und der Abstrahlwinkel des Senders sind speziell für diese Aufgabenstellung angepasst. Die Handhabung des Gerätes ist unkompliziert und durch den Akkubetrieb sehr praktisch. Dies geht allerdings zu Kosten der Leistung und somit auch der Eindringtiefe des eingekoppelten Signals.

Im Folgenden sollen nun einige Stärken und Schwächen des Gerätes sowie nochmal die Ergebnisse des Projekts zusammengefasst werden.

Mit dem Messverfahren können schnell große Flächen zerstörungsfrei vermessen werden. Dabei muss das Messgerät nur auf die Oberfläche aufgesetzt werden. Es können sowohl Punktmessungen (A-Scans) als auch Messwerte über eine bestimmte Strecke (B-Scan) kontinuierlich aufgenommen werden. Über das KI-basierte Auswerteverfahren sind nur wenige Nutzerinteraktionen (erste Charakterisierung des Baumaterials, Dicke des Mauerwerks) nötig, was eine schnelle und benutzerfreundliche Auswertung der generierten Daten sicherstellt. Dabei werden schlechte oder unzureichende Messsignale automatisch durch den Algorithmus herausgefiltert. Als Ergebnis werden absolute Feuchtwerte in M-%, analog zu den gravimetrischen Untersuchungen angegeben. Dabei kann das Messsystem unabhängig vom Salzgehalt die Feuchtigkeit in mineralischen Baustoffen bestimmen. Die Messungen an realen Objekten auf Basis von Sandstein- und Ziegelmauerwerken haben gezeigt, dass die Modelle auch für ähnliche Materialien, wie jene welche zum Training genutzt wurden, funktionieren. Neben dem Material muss auch die Mächtigkeit des Mauerwerks bekannt sein. Dabei konnte an den realen Objekten zwischen den Ergebnissen des Darr-Verfahrens und der Radarmessung ein mittlerer Fehler von 1,22 M-% ermittelt werden. Bei den Messungen im Labor beträgt der mittlere Fehler zwischen 0,41 und 1,97 M-%.

Im Vergleich zu der Probenentnahme für die Gravimetrie, kann bei dem Radarmessverfahren in der Regel keine individuelle Staffelung von Tiefenprofilen vorgenommen werden. Die Daten bilden dabei nur Durchschnittswerte bezogen auf die rückreflektierte Wegstrecke ab. Das setzt für die Auswertung voraus, dass eine Rückreflexion noch deutlich messbar ist. Die begrenzenden Faktoren sind dabei die Leistung des Radargerätes, die Dicke des Mauerwerks sowie der vorherrschenden, in Lösung befindlichen Salzlast, die maßgeblich für die Dämpfung der Radarwelle verantwortlich ist. Somit ist die Eindringtiefe aktuell noch begrenzt und liegt mit dem im Projekt verwendeten Gerät, abhängig von den gelösten Salzen bei etwa 25 – 30 cm. Die oben berechneten Fehler sowie die Schwächen des aktuellen Messsystems könnte über die Anpassung der Hardware an die Anwendungssituation vermutlich weiter reduziert werden.

In Bezug auf die Bestimmung von Schadsalzen kann eine grobe Einteilung in keine / geringe Salzlast, mittlere Salzlast beziehungsweise hohe Salzlast erfolgen. Eine qualitative Benennung der Salze ist nicht möglich. Zudem können nur gelöste Salze detektiert werden. Bereits auskristallisierte und somit elektrisch neutrale Salze, sind nicht messbar. Für den Fall, dass die Art und absolute Menge der Salze im Mauerwerk bestimmt werden muss, kann das Radarverfahren aufgrund der schnellen Anwendung eine großflächige Analyse des Subjektes liefern und relevante Positionen, an denen vermehrt Salze auftreten, identifizieren. Im Nachgang können einige wenige Bohrprobenentnahmen durchgeführt werden um die Mauerproben im Labor zu analysieren.

Viele dieser Grenzen sind hardwarebedingt, da das zur Verfügung stehende Radargerät für derartige Messungen nicht ausgelegt ist. Für weitere Studien sollte eine fokussiertere Abstrahlcharakteristik des Senders gewählt werden. Dadurch wäre bei gleicher Leistung eine größere Eindringtiefe möglich und die Qualität des rückreflektierten Signals könnte deutlich verbessert werden. Auch werden somit mögliche Streueffekte, die das Signal überlagern können, minimiert. Desweiteren sollte der Sender eine größere Leistung besitzen um auch bei höheren Salzlasten mit entsprechender Dämpfung noch ein ausreichend gutes Signal messen zu können. Ein möglicher nächster Schritt wäre ein Folgeprojekt mit Radargeräteherstellern bei dem eine Leistungsanpassung/Richtcharakteristikanpassung unter rechtlichen Bedingungen erfolgen kann.

Durch das in diesem Projekt entwickelte Verfahren bieten sich neue Möglichkeiten für die Baupraxis. So ist es erstmals möglich, ein großflächiges, zeitlich wiederholbares Monitoring durchzuführen und das bei selber physikalischer Einheit wie das aktuelle, zerstörende Standardverfahren. Im Vergleich zu bestehenden handheld Geräten kann neben einer Aussage über Feuchtigkeit auch eine (rudimentäre) Information über die gelösten Salze und deren großflächiger Verteilung gewonnen werden. Für eine genaue Ermittlung der Zusammensetzung und Menge an Salzen im Mauerwerk können mit dem Radarverfahren die relevanten Stellen für aussagekräftige Bohrprobennahmen im Vorfeld identifiziert und somit die Häufigkeit an zerstörendem Eingreifen in die Bausubstanz reduziert werden.

Publikationen

Blaschke, O.; Brand, F.; Drese, K.S. Quantification of Humidity and Salt Detection in Historical Building Materials via Broadband Radar Measurement. *Sensors* 2023, 23, 4616. <https://doi.org/10.3390/s23104616>

Frenzel, D.; Blaschke, O.; Franzen, C.; Brand, F.; Haas, F.; Troi, A.; Drese, K.S. Quantification of Moisture in Masonry via AI-Evaluated Broadband Radar Reflectometry. *Heritage* 2023, 6, 5030-5050. <https://doi.org/10.3390/heritage6070266>

Darüber hinaus wurde das Projekt auf SWBSS ASIA 2023 (First International Conference in Asia on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures) 20-22 September 2023 in Nara, Japan, vorgestellt:

Frenzel, D., Blaschke, O., Franzen, C., Brand, F., Haas, F., Troi, A., Drese, K.S. (2023) Quantification of Moisture in Masonry via AI-Evaluated Broadband Radar Reflectometry, in: M. Abuku & N. Takatori (Eds.) *Proceedings of SWBSS ASIA 2023 First International Conference in Asia on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, Nara, Japan, p. 195-206.

https://repository.hawk-hhg.de/images/9/97/SWBSS_ASIA_2023_Proceedings.pdf

Die Ergebnisse (im Projekt entwickelten Algorithmen, trainierten KI Modelle und Testdaten des Radarsensors) stehen außerdem in digitaler Form zur Verfügung:

<https://faubox.rrze.uni-erlangen.de/getlink/fiQ5c35NEP6QGGV97Fdkt7/MuReMa%20ver%C3%B6ffentlicht.7z>

Mitwirkende

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Prof. Dr. Ing. Alexandra Troi hält seit März 2018 an der Hochschule Coburg die Professur „Simulation Bauphysik“, welche für den neuen Masterstudiengang „Digitale Denkmaltechnologien“ geschaffen wurde. Sie lehrt in diesem Studiengang „Bauphysik am Baudenkmal“ sowie „Bauphysikalische Bewertung und Sanierung“ als Vertiefung und Profilierung, aber auch im Studiengang „Denkmalpflege“ (ebenfalls in Kooperation mit der Universität Bamberg) in deren Anwendungswoche „Sanierungstechnologien“ und bietet für die Bachelor Architektur, Innenarchitektur und den Master Design ein Wahlfach „Energetische Sanierung im historischen Gebäudebestand“ an.

Prof. Dr. Klaus Stefan Drese ist seit Oktober 2016 an der Hochschule Coburg Forschungsprofessor und leitet das Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT) der Hochschule mit 25 Mitarbeitern, eigenem Forschungsgebäude mit 1200 m² und jährlichen Umsatz von ungefähr 1,6 M€. Prof. Dr. Klaus Stefan Drese ist Mitglied und Sprecher des Forschungsschwerpunkts Sensorik und Analytik der Hochschule Coburg. Einer seiner Forschungsschwerpunkte liegt im Bereich der angewandten akustischen Sensorik und der Simulation und Modellierung. Die Erfahrungen auf dem Gebiet der Akustik bilden die Grundlage für im geplanten Projekt vorgesehen Untersuchungen. Unterstützt wird Prof. Dr. Drese von erfahrenen ISAT-Wissenschaftlern aus den Fachbereichen „Simulation und Test“ und der „Technischen Physik“ mit umfangreichen Kenntnissen in der Simulation der Wellenausbreitung und deren Wechselwirkungen, der Auslegung von Sensoren und Integration von Sensoren in Laborprüfstände, Design-of Experiments und Entwicklung von Datenauswertungsalgorithmen für eine machine learning basierte Messdatenanalyse.

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen

und Sachsen-Anhalt e. V. IDK; Dr. Christoph Franzen

Das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt (IDK), Dresden, ist ein gemeinnützig eingetragener Verein zur Koordinierung von Forschungsarbeiten und Durchführung von Untersuchungen zu naturwissenschaftlichen, ingenieurtechnischen und restauratorischen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Instandsetzung geschädigter Denkmale. Das IDK ist seit über 20 Jahren erfolgreich in diesem Sinne tätig und verfügt über einen soliden Erfahrungshorizont in der wissenschaftlichen Umsetzung und formalen Abwicklung von Projekten mit verschiedenen Förderern. Für die praxisorientierte Forschung an den Bauteiloberflächen werden am Institut neue Verfahrenstechnologien eingesetzt. Vormalig destruktive Methoden wurden zu minimalinvasiven und haptische zu berührungslosen weiterentwickelt. Die Forschungsergebnisse werden objektübergreifend ausgewertet und sowohl in Fachkreisen publiziert und, entsprechend aufbereitet, an Anwender weitergegeben. Das IDK erarbeitet beispielsweise in nationalen Gremien der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.) neue Merkblätter zum jeweiligen Stand der Technik. Im Bereich der Schadensanalyse; Beschreibung der Schadensphänomene, Bestimmung der Schadensfaktoren, Benennung der Schadensprozesse und Behebung der Schadensursachen für Bauteiloberflächen verfügt das IDK über einen großen Erfahrungsschatz. Neben fast einhundert Projekten mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) bei denen auch viele durch das IDK koordiniert wurden, mehreren Projekten mit dem Bundesamt für Bau und Raumordnung (BBSR), bspw. SWD – 10.08.18.7 – 14.16 und SWD-10.08.18.7-12.04, sowie BMBF 01IS18017, war das IDK Partner in den erfolgreich abgeschlossenen EU-Projekten OnSiteForMasonry (EVK4-CT-2001-00060), CHEF (FP-2005-SSP-5A) und 3ENCULT (FP7-2010-NMP-ENV-ENERGY-ICT-EeB).

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- Adamowski, Józef; Hoła, Jerzy; Matkowski, Zygmunt (2005): Probleme und Lösungen beim Feuchtigkeitschutz des Mauerwerks von Baudenkmälern am Beispiel zweier großer Barockbauten in Wrocław. In: *Bautechnik* 82 (7), S. 426–433. DOI: 10.1002/bate.200590148.
- Agliata, Rosa; Bogaard, Thom A.; Greco, Roberto; Mollo, Luigi; Slob, Evert C.; Steele-Dunne, Susan C. (2018): Non-invasive estimation of moisture content in tuff bricks by GPR. In: *Construction and Building Materials* 160, S. 698–706. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.103.
- Bayer, K; Köhler, W; Schuh, H; Wendler, E (2010): Vergleichsuntersuchungen mit unterschiedlichen zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Feuchte- und Salzmessmethoden. In: 4. *Konservierungswissenschaftliches Kolloquium in Berlin und Brandenburg. Hsg.*, S. 69–74.
- Bourdi, Taoufik; Rhazi, Jamal Eddine; Boone, François; Ballivy, Gérard (2008): Application of Jonscher model for the characterization of the dielectric permittivity of concrete. In: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (20), S. 205410. DOI: 10.1088/0022-3727/41/20/205410.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand.
- Derluyn, Hannelore; Janssen, Hans; Carmeliet, Jan (2011): Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. In: *Construction and Building Materials* 25 (9), S. 3685–3693. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.063.
- Dérobot, Xavier; Villain, Géraldine (2017): Effect of water and chloride contents and carbonation on the electromagnetic characterization of concretes on the GPR frequency band through designs of experiment. In: *NDT & E International* 92, S. 187–198. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.09.001.
- DIN EN 16682:2017-05: DIN EN 16682:2017-05.
- DIN EN 16883:2017-08: DIN EN 16883:2017-08,
- DIN EN ISO 12570:2018-07: DIN EN ISO 12570:2018-07.
- Du Plooy, R.; Villain, G.; Palma Lopes, S.; Ihamouten, A.; Dérobot, X.; Thauvin, B. (2015): Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study. In: *Mater Struct* 48 (1-2), S. 369–386. DOI: 10.1617/s11527-013-0189-z.
- Goetzke-Pala, Adelajda; Hoła, Anna; Sadowski, Łukasz (2018): A non-destructive method of the evaluation of the moisture in saline brick walls using artificial neural networks. In: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18 (4), S. 1729–1742. DOI: 10.1016/j.acme.2018.07.004.
- Guilbert, David; Guan, Borui; Ihamouten, Amine; Villain, Geraldine; Derobot, Xavier (2021): Linking Degree of Saturation With the Complex Dielectric Permittivity of Limestone in a GPR Frequency Band Using SVR. In: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70, S. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2020.3024037.
- Hasted, J. B.; Shah, M. A. (1964): Microwave absorption by water in building materials. In: *Br. J. Appl. Phys.* 15 (7), S. 825–836. DOI: 10.1088/0508-3443/15/7/307.
- Hoekstra, P.; Delaney, A. (1974): Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. In: *J. Geophys. Res.* 79 (11), S. 1699–1708. DOI: 10.1029/JB079i011p01699.
- Hola, A. (2017): Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings – the overview of methods. In: *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 251, S. 12067. DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012067.

- Hoła, Anna; Sadowski, Łukasz (2019): A method of the neural identification of the moisture content in brick walls of historic buildings on the basis of non-destructive tests. In: *Automation in Construction* 106, S. 102850. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102850.
- Hugenschmidt, Johannes; Loser, Roman (2008): Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar. In: *Mater Struct* 41 (4), S. 785–792. DOI: 10.1617/s11527-007-9282-5.
- Ihamouten, Amine; Chahine, Khaled; Baltazart, Vincent; Villain, Géraldine; Derobert, Xavier (2011): On Variants of the Frequency Power Law for the Electromagnetic Characterization of Hydraulic Concrete. In: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (11), S. 3658–3668. DOI: 10.1109/TIM.2011.2138210.
- Ihamouten, Amine; Villain, Géraldine; Dérobert, Xavier (2012): Complex Permittivity Frequency Variations From Multioffset GPR Data: Hydraulic Concrete Characterization. In: *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 61 (6), S. 1636–1648. DOI: 10.1109/TIM.2012.2190330.
- Jones, Scott B.; Friedman, Shmulik P. (2000): Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles. In: *Water Resour. Res.* 36 (10), S. 2821–2833. DOI: 10.1029/2000WR900198.
- Kalogeropoulos, A.; van der Kruk, J.; Hugenschmidt, J.; Busch, S.; Merz, K. (2011): Chlorides and moisture assessment in concrete by GPR full waveform inversion. In: *Near Surface Geophysics* 9 (3), S. 277–286. DOI: 10.3997/1873-0604.2010064.
- Krause, Hans-Joachim; Rath, Edmund; Sawade, Gottfried; Dumat, Frank (2007): Radar-Magnet-Betontest: Eine neue Methode zur Bestimmung der Feuchte und des Chloridgehalts von Brückenfahrbahnplatten aus Beton. In: *BUST* 102 (12), S. 825–834. DOI: 10.1002/best.200700586.
- Leschnik, W (1999): Feuchtemessung an Baustoffen–Zwischen Klassik und Moderne. In: *DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, Technische Universität*.
- Maierhofer, C; Wöstmann, J; Trela, C; Röllig, M (2008): Investigation of moisture content and distribution with radar and active thermography. In: Luigia Binda, Marco Di Prisco und R. Felicetti (Hg.): On site assessment of concrete, masonry and timber structures. Varenna, Italy, 1-2 September 2008. Bagneux, France: RILEM Pub (RILEM proceedings, PRO 59), S. 411–420.
- Maierhofer, C.; Leipold, S. (2001): Radar investigation of masonry structures. In: *NDT & E International* 34 (2), S. 139–147. DOI: 10.1016/S0963-8695(00)00038-4.
- Maierhofer, Ch.; Wöstmann, J. (1998): Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies. In: *NDT & E International* 31 (4), S. 259–263. DOI: 10.1016/S0963-8695(98)00011-5.
- Maierhofer, Christiane (2003): Nondestructive Evaluation of Concrete Infrastructure with Ground Penetrating Radar. In: *J. Mater. Civ. Eng.* 15 (3), S. 287–297. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(287).
- Mouhasseb, Haissam (2007): Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens.
- Pisa, S.; Pittella, E.; Piuze, E.; D'Atanasio, P.; Zambotti, A. (2017): Permittivity measurement on construction materials through free space method. In: I²MTC 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2017 proceedings papers : May 22-25, 2017, Politecnico di Torino, Torino, Italy. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Torino, Italy, 5/22/2017 - 5/25/2017. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–4.
- Sachse, Wolfgang; Pao, Yih-Hsing (1978): On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids. In: *Journal of Applied Physics* 49 (8), S. 4320–4327. DOI: 10.1063/1.325484.

Senin, S. F.; Hamid, R. (2016): Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab. In: *Construction and Building Materials* 106, S. 659–669. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.156.

Sihvola, Ari (2000): Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients. In: *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 1 (4), S. 393–415. DOI: 10.1023/A:1026511515005.

Singer, Ferdinand (2015): Mess- und Analysemethoden in der Laserakustik bei breitbandiger Laseranregung. In: *tm - Technisches Messen* 82 (1), S. 45–51. DOI: 10.1515/teme-2014-0030.

Wai-Lok Lai, Wallace; Kind, Thomas; Kruschwitz, Sabine; Wöstmann, Jens; Wiggerhauser, Herbert (2014): Spectral absorption of spatial and temporal ground penetrating radar signals by water in construction materials. In: *NDT & E International* 67, S. 55–63. DOI: 10.1016/J.NDTEINT.2014.06.009.

Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (2019): Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen. Deutsche Fassung vom Dezember 2019, Ausgabe 12/2019/D. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (WTA-Merkblatt, 3-13).

WTA (2002): Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. WTA Merkblatt 4-11. Referat 4 Bauwerksabdichtung. Unter Mitarbeit von Uwe Schürger und Heinrich Wigger. Ausgabe: 12.2002/D, Endgültige Fassung: Oktober 2003. Stuttgart, [Pfaffenhofen]: Fraunhofer IRB-Verlag; WTA Publications (WTA-Merkblatt, 4-11).

Xiao, Xiaoting; Guan, Borui; Ihamouten, Amine; Villain, Géraldine; Dérobert, Xavier; Tian, Guiyun (2018): Monitoring water transfers in limestone building materials with water retention curve and Ground Penetrating Radar: A comparative study. In: *NDT & E International* 100, S. 31–39. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.08.002.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Invasive Probenentnahme durch Gewinnung von Bohrmehlproben. Für den gravimetrischen Nachweis einer Feuchtebelastung müssen über Bohrungen Materialproben entnommen werden, die dann anschließend im Labor ausgewogen und getrocknet werden. Die Methode bietet den Vorteil einer tiefengestaffelten Auflösung der gewonnenen Ergebnisse. Diese Methode stellt aktuell noch den Goldstandard im Bereich der Feuchtemessung dar. [Foto: Franziska Haas] 12
- Abbildung 2: Realteil ϵ' und Imaginärteil ϵ'' der komplexen Dielektrizitätszahl von Wasser bei 25°C in Abhängigkeit von der Frequenz nach (Leschnik 1999). In hellblau ist der Bereich eingezeichnet, in dem sich die Werte für den Realteil ϵ' für die meisten Baustoffe befindet. Der Imaginärteil ϵ'' liegt bei etwa 0. 13
- Abbildung 3: Schematisch dargestelltes Messkonzept. Bei einem durchgängig homogenen Medium (im linken Bild) ist nur eine Aussage über die integrale Wegstrecke möglich. Handelt es sich zum Beispiel um ein geschichtetes Mauerwerk, mit einer dazwischenliegenden Mörtelschicht die eine Materialgrenze darstellt, könnten über die Reflexionen an den einzelnen Grenzschichten tiefenabgestufte Informationen gewonnen werden. 17
- Abbildung 4: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Scanarten: A-Scan = Punktmessung (rote Pfeile); B-Scan = aus mehreren hintereinanderliegenden A-Scans (blaue Flächen) > Linienmessung, C-Scan = mehrere hintereinanderliegende Linienmessungen > Flächenmessung (grüne Fläche) 19
- Abbildung 5: Überblick über die Bearbeitung aller Arbeitspakete über den kompletten Projektverlauf. 21
- Abbildung 6: An Messdaten gefittetes Jonscher 3-Parameter-Modell (Bourdi et al. 2008) 23
- Abbildung 7: Dispersionsverlauf der komplexen Permittivität von Beton. Blau: Messdaten aus Mouhasseb 2007; Rot: Gefittete Werte als Eingangsgröße für das Simulationsmodell. 25
- Abbildung 8: Simulierte dispersive Wellenausbreitung mit Streureflexionen. Die roten Punkte sind die Maxima der Einhüllenden. Der blau eingefärbte Kurvenbereich entspricht dem gefensterten Signal. 26
- Abbildung 9: Testmessung mit dem Radarmodul GP8800 von Proceq bei einer Produktvorführung. Mauerwerkstestkörper mit nach ob hin abnehmenden Feuchtigkeitsgradienten. [Foto: Oliver Blaschke] 27
- Abbildung 10: Gemessener Realteil der relativen Permittivität der Ziegelwand. Obere drei Kurven (3-15 cm): nasser Bereich, untere drei Kurven (35-50 cm): trockener Bereich 28
- Abbildung 11: Gemessener Imaginärteil der relativen Permittivität der Ziegelwand: 3-15 cm = nasser Bereich, 35 – 40 cm = trockener Bereich. Messkurven normiert bei 1 GHz. 28
- Abbildung 12: Messung an zwei hintereinanderliegenden einzelnen Ziegelsteinen. Puls 1 ist hier das erste detektierte Reflektionssignal und Puls 2 das zweite Signal, reflektiert an der Rückseite des zweiten Ziegels. 29
- Abbildung 13: Messung des Trocknungsvorgangs an einem einzelnen freistehenden Ziegel (Einhüllende des Zeitsignals, LT102). 29
- Abbildung 14: Feuchtigkeitskennfeld des Imaginärteils der Permittivität für den Baustoff Ziegel (Volllinien). Frequenzkurve für frei wählbaren Feuchtigkeitswert wird zwischen definierten Referenzkurven interpoliert. 31
- Abbildung 15: Simuliertes Propagationsverhalten eines Radarimpulses in Ziegelstein für verschiedene Feuchtigkeitsgrade. Eine höhere Feuchtigkeit bewirkt nicht nur eine spätere Ankunftszeit, sondern auch eine erhöhte Signaldämpfung. 32
- Abbildung 16: Sander Sandstein, gesägte Oberfläche, makroskopische Aufnahme [Foto: Christoph Franzen] 34
- Abbildung 17: Sander Sandstein, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt [Foto: Franzen] 34

- Abbildung 18: Vollziegel Wienerberger makroskopische Aufnahme [Foto: Christoph Franzen] 34
- Abbildung 19: Ziegel, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt [Foto: Christoph Franzen] 34
- Abbildung 20: Trasskalkmörtel im Streiflicht, makroskopische Aufnahme [Foto: Christoph Franzen] 34
- Abbildung 21: Mörtel, Mikroskop, Einbettungsharz in den Poren blau eingefärbt [Foto: Christoph Franzen] 34
- Abbildung 22: Schematische Darstellungen der unterschiedlichen Mauerwerksprüfkörper. Oben: Dimensionen und unterschiedliche Platzierung der Messfelder im Ziegelmauerwerk. Der hier schematisch gezeigte Mauerwerksverbund entspricht nicht dem der endgültig aufgebauten Mauern. Unten: Dimensionen und unterschiedliche Platzierung der Messfelder im Natursteinmauerwerk 36
- Abbildung 23: Aufbau der Mauerwerkskörper. Um die Mauerwerkskörper später besser mit einem Hubwagen anheben zu können, wurden sie auf entsprechenden Gitterrosten aufgebaut. [Foto: Franziska Haas] 37
- Abbildung 24: Testkörper in den entsprechenden Profilwannen am endgültigen Lagerplatz. [Foto: Frenzel] 38
- Abbildung 25: Elektrisches Messsystem. Einbau des elektrischen Messsystems am Beispiel der Ziegelmauern. Im linken Bild sind jeweils zwei mit Hilfe eines Spreizdübels aus Messing in das Material verschraubte Messingstangen zu sehen. Die wegführenden Kabel wurden mit einer Mutter und einem entsprechenden Ringkabelschuh mit dem Messingstab fest verschraubt und mit einer Acrylmasse abgedichtet. Im rechten Bild ist ein schon im Mauerwerksverbund platzierter „Messstein“ zu sehen. [Foto: Foto: Franziska Haas] 39
- Abbildung 26: Höhe der einzelnen eingebauten „Messsteine“ und den Positionen der ersten Bohrmehlentnahmepositionen. In diesem Fall handelt es sich um die Ziegel- und Sandsteinmauer aus der grauen Wanne. Die einzelnen Bezeichnungen der Messpositionen sind zusätzlich auf den runden, roten Aufklebern geschrieben. [Foto: Daniel Frenzel] 40
- Abbildung 27: Vergleich zwischen 2D und 3D Simulationen. Es ist gut zu sehen, dass in den ersten Tagen schon sehr viel Wasser aufgenommen wird und sich - zumindest bei den dreidimensionalen Modellen - schon nach kurzer Zeit eine Sättigung in den konstruierten Mauerwerken einstellt, da kein weiteres Wasser mehr aufgenommen wird. Auch der Wassergehalt der zweidimensionalen Modelle strebt einen Grenzwert an, der während der Dauer dieser Simulation noch nicht erreicht wurde. 42
- Abbildung 28: Ergebnisse der 3D Simulation mit angepassten Kennwerten der Baumaterialien sowie den allgemein Vorherrschenden Randbedingungen und dem Flüssigwasserleitwiderstand von $1 \cdot 10^{10} \text{ m/s}$ zwischen den Materialgrenzen. 43
- Abbildung 29: Zeitplan eines möglichen Bewässerungszyklus mit Trocknungsphase. Gut zu sehen ist hier, dass in den ersten Tagen schon sehr viel Wasser aufgenommen wird. Dagegen ist die Trocknungsphase deutlich träger und somit können die Mauern bequem in mehreren Feuchtestufen beobachtet werden. 44
- Abbildung 30: Bewertung der Gefährdung durch unterschiedliche Konzentrationen von Anionen aus bauschädlichen Salzen in Mauerwerken. Übersicht aus Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 2019 46
- Abbildung 31: Ergebnis Delphinsimulation an einzelnen, maßstabsgetreuen Bausteinmodellen. Die Simulationsdauer beträgt hier 20 Tage. Bereits nach einem Tag im „Wasserbad“ sind die Baumaterialien vollständig gesättigt. Gut zu sehen ist, dass zwischen 6 und 11 Tagen nach Beginn der Trocknung schon ein Großteil des Wassers bereits wieder abgetrocknet ist und theoretisch mit einem weiteren Zyklus begonnen werden kann. 47
- Abbildung 32: Steighöhe des Wassers, gut erkennbar am Sandsteinmauerwerk. [Foto: Daniel Frenzel] 49
- Abbildung 33: Querschnitt durch eine in Delphin konstruierte, dreidimensionale Sandsteinwand. Das Simulationsergebnis zeigt die Feuchteverteilung nach 17 Tagen der Wässerung im linken Bild. Im rechten Bild ist die Situation 10 Tage nach dem Ablassen des Wassers dargestellt. Gut zu sehen ist die über das Integral des Querschnittes gleichmäßige Verteilung des aufgenommenen Wassers. 50

- Abbildung 34: Entnahme von Bohrmehlproben und Bestimmung der Entnahmefeuchte [Foto: Franzen] 51
- Abbildung 35: Links: Mauerwerke kurz vor dem Ablassen des Wassers. Rechts: Messung mit dem Radargerät entlang der Positionierungshilfe aus AP4. Im linken Bild ist gut der Saughorizont am Sandsteinmauerwerk kurz nach dem Ablassen des Wassers zu sehen. [Foto: Daniel Frenzel] 52
- Abbildung 36: Beprobungsraster der Ziegelmauer, Raster für die systematische Probenentnahme an der Ziegelmauer. An jeder mit einem x markierten Stelle wurde eine Messung vorgenommen. Für die Ziegelmauer ergeben sich somit insgesamt 50 Messpunkte. 53
- Abbildung 37: Beprobungsraster der Sandsteinmauer. Raster für die systematische Probenentnahme an der Sandsteinmauer. An jeder mit einem x markierten Stelle wurde eine Messung vorgenommen. Für die Sandsteinmauer ergeben sich somit insgesamt 62 Messpunkte. 53
- Abbildung 38: Erstes Mauerwerkspaar nach der Bohrmehlentnahme. Aufgrund der unterschiedlichen Mauerkonstruktionen wurde für jedes Material ein eigenes orthogonales Raster angelegt. [Foto: Frenzel] 54
- Abbildung 39: Zweites Beprobungsraster der Ziegelmauer. Aus dem angelegten Raster ergeben sich hier nun insgesamt 24 Messpunkte 54
- Abbildung 40: Zweites Beprobungsraster der Sandsteinmauer. Durch das angelegte Raster an der Sandsteinmauer ergeben sich hier insgesamt 16 Messpunkte 55
- Abbildung 41: Zweites Mauerwerkspaar mit deutlich reduzierter Probenmenge. Bei der zweiten flächenhaften Messaktion wurde die entnommene Probenmenge reduziert. Hier gut am rechten oberen Eck des Sandsteinprobekörpers (rechts) zu sehen ist die teilweise Zugabe an Wasser von oben. Das linke und deutlich hellere Eck scheint augenscheinlich noch weitestgehend trocken zu sein. Äquivalent dazu, in der Aufnahme allerdings nicht zu erkennen, wurde die linke obere Hälfte der Ziegelmauer zusätzlich bewässert. [Foto: Daniel Frenzel] 55
- Abbildung 42: Vermessung des Trocknungsprozesses einzelner Mauersteine entlang einer Achse mit dem Radargerät. Fortwährende Gewichtsmessung erlaubt Rückschlüsse über Wassergehalt im Probekörper. [Foto: Felix Brand] 56
- Abbildung 43: Links: Sandsteinblock nach der 3. Bohrmehlentnahme. Sandsteinblock der insgesamt schon 3-mal vermessen wurde. Im oberen Drittel sind schon deutliche Salzausblühungen zu sehen. Rechts: kleiner Ziegelprüfkörper mit insgesamt 6 Bohrlöchern. [Foto: Daniel Frenzel] 57
- Abbildung 44: Luftaufnahme des Staatsarchives in Nürnberg 58
- Abbildung 45: Situation einer Wandfläche nach der Bohrkernentnahme. Die Bohrkernentnahme hier fand im Kellergewölbe eines Seitengebäudes des Staatsarchives statt. [Foto: Daniel Frenzel] 58
- Abbildung 46: Luftaufnahme der Grundschule St. Johannis in Nürnberg. 59
- Abbildung 47: Situation einer Wandfläche nach der Bohrkernentnahme. Hier gut zu sehen die starke Belastungssituation an einer Kellerwand der Grundschule. Die Situation hinter der Wand ist unbekannt. Durch starke Feuchte- und Salzbelastung ist die aufgebrachte Farbe an einigen Stellen schon abgängig, ebenfalls gut erkennbar an dem weißen Pulver auf dem Boden am Fuße der Wand. Im rechten Bild ist gut zu sehen, wie die Farbe sich deutlich vom Untergrund löst. Lokal sind auskristallisierte Salze auf der Oberfläche erkennbar. [Foto: Daniel Frenzel] 59
- Abbildung 48: Fotos des Wohnhauses. Links: Nordost Fassade; Rechts: Südostfassade mit Hauseingang. [Foto: Franiska Haas] 60
- Abbildung 49: Situation im Innenraum des Wohnhauses. Linkes Foto: Blick von der Eingangstür mit bereits vom Putz befreiten Ziegelwänden. Rechtes Foto: Blick auf zwei Außenmauern mit noch vorhandenem Putz und Oberflächengestaltung. [Foto: Fransziak Haas] 60

- Abbildung 50: Das linke Bild zeigt die Entnahme der Bohrmehlproben in einem Höhenprofil über drei Stufen. Im rechten Bild ist eine Detailaufnahme einer Probeentnahmestelle zu sehen. [Foto: Daniel Frenzel] 61
- Abbildung 51: Verlauf der Widerstandsmessungen an den Mauerwerksprüfkörpern in der blauen Profilwanne. Die Diagramme zeigen die aufgezeichneten Werte der Widerstandsmessung vom Zeitpunkt der Errichtung der Mauerwerkskörper (Ziegelmauern wurden vor den Natursteinmauern gebaut) bis Anfang Juli 2022. Ebenfalls gekennzeichnet sind die Zeitpunkte an denen die Mauern unter Wasser gesetzt (Bewässerung) und an denen das Wasser abgelassen (Trocknung) wurde. 62
- Abbildung 52: Kreuzleistungsspektrum eines ursprünglich gesättigten Ziegels (0 h) zu bestimmten Trocknungszeiten in Stunden (siehe Legende) 64
- Abbildung 53: Verlauf des Realteils (links) und Imaginärteils (rechts) für verschiedene Trocknungszeitenpunkte wie in Abbildung 52. In rot sind jeweils die Spitzenfrequenzbereiche gekennzeichnet. Für den Realteil ist in hellgrau das Mittelwertmodell eingezeichnet. Für den Imaginärteil wurde das lokale Minimum jeder einzelnen Kurve verwendet (schwarze Punkte). 65
- Abbildung 54: Eingabemaske zum Auswertalgorithmus. Eingabeparameter sind Anregung A) und propagiertes Messsignal B). Ausgabe der Verläufe von Real- und Imaginärteil der Permittivität in den entsprechenden Fenstern C) und D). 66
- Abbildung 55: Programmoberfläche für die teilautomatisierte Auswertung von mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden B-Scans desselben Mauerwerks. Der Algorithmus ermittelt die Breite der Fensterfunktion für jeden A-Scan (links) automatisch über die Länge eines B-Scan (rechts). Signale mit unzureichender Signalqualität wurden erkannt und herausgefiltert (rechts, rote Streifen). 66
- Abbildung 56: Inputvariablen für das Neuronale Netzwerk. Links: Frequenzdaten von Phasenwinkel und Imaginärteil der Permittivität. Rechts: Zeitbereichsdaten mit relevanter Nullstelle. 67
- Abbildung 57: Links: Struktur des Neuronalen Netzes zur Feuchtigkeitsvorhersage. Rechts: Neuronales Netz zur Salzvorhersage. „Conv1D“ Schichten sind eindimensionale Faltungsnetze zur Verarbeitung von vektoriellen Frequenzdaten. „Dense“ Schichten verarbeiten hauptsächlich skalare Daten aus dem Zeitbereich. Rectified Linear Unit (ReLU) bzw. „leaky“ ReLU als Aktivierungsfunktion der Neuronen. 68
- Abbildung 58: Visualisierung eines Grid Search Verfahrens, Root mean squared error (RMSE) als Evaluationsgröße 69
- Abbildung 59: Vorhersagen des Neuronalen Netzes am Validierungsset. Links: Für das Sandsteinmodell, Rechts: Für das Ziegelmodell 70
- Abbildung 60: Links: Modellparameter des Realteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Ziegel zeigen keine Abweichung gegenüber den salzfreien Ziegeln. Rechts: Modellparameter des Imaginärteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Ziegel zeigen einen deutlich höheren Imaginärteil (entspricht einer höheren Dämpfung der Radarwelle) als die salzfreien Ziegel. 71
- Abbildung 61: linke Seite: Einfluss unterschiedlicher Salzarten auf die Radarmessung bei konstanter Moldichte von 0.012 mol/kg. Sandsteingröße in cm: 25 x 15 x 15 rechte Seite: Einfluss unterschiedlicher Salzarten auf die Radarmessung bei konstanter Moldichte von 0.02 mol/kg. Sandsteingröße in cm: 30 x 15 x 25 72
- Abbildung 62: Einteilung der Salzwirkung in qualitative Klassen. In dem Diagramm sind die Ergebnisse der Sandsteinblöcke dargestellt.. 73
- Abbildung 63: Modellparameter des Realteils für verschieden hohe Wassergehalte. Salzbelastete Sandsteine zeigen keine signifikante Abweichung gegenüber den salzfreien Sandsteinen. 74
- Abbildung 64: Messreihe an einem exemplarischen Sandsteinblock (40 cm x 25 cm x 20 cm) welcher mit MgSO_4 Lösung versetzt wurde (kategorisiert als mittlere Salzlast). Die Ringe um die Datenpunkte der Radarergebnisse geben die Vorhersage bezüglich der Salzlast an. 75

Abbildung 65: Ergebnis der gravimetrischen Feuchtemessung (graue Profilwanne). Zum Zeitpunkt der Probenentnahme stand dieses Mauerwerkspaar etwa 6 Monate im Inneren zusammen mit den übrigen Prüfkörpern. Der Farbcode als auch die Beschriftung der Diagramme beschreibt jeweils die Höhenstufe, aus welcher die Proben entnommen wurde. Die sechs Säulen innerhalb eines Diagramms repräsentieren dabei die einzelnen Tiefenstufen in 2 cm Schritten von 0 – 12 cm. 77

Abbildung 66: Ergebnis der gravimetrischen Feuchtemessung (graue Profilwanne) nach 36 Tagen Wässerung. 77

Abbildung 67: Trocknungsprozess der Sandsteinmauer in der blauen Wanne, überwacht mit dem Radargerät. Erster Messpunkt (T) ist eine Messung der Mauer im Trockenzustand. Die Farben der Höhenstufen entsprechen dem Farbcode, der im Kapitel Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes festgelegt wurde. 78

Abbildung 68: Sandsteinmauer mit den insgesamt 16 Messpositionen aus vier Probenahmeaktionen, die den Trocknungsverlauf über etwa drei Wochen darstellen sollen. [Foto: Daniel Frenzel] 79

Abbildung 69: Vergleich der Entnahmefeuchten der Gravimetrie (schwarze Linie) mit den Ergebnissen der Radarmessungen (grüne Punkte). Gravimetrie und Radarmessungen stimmen in den ersten zwei Probenahmeaktionen gut überein. Bei den darauffolgenden Messungen tendieren die Radarmessung eher zu höheren Feuchtegehalten. 79

Abbildung 70 Auswertung Gravimetrie der großen konzertierten Bohraktion auf der linken Seite und mit den von der KI vorhergesagten Werte auf der rechten Seite. Die Werte der Skalen auf der rechten Seite geben die absolute Feuchte in m% an. Da aufgrund von Streueffekten am Rand nicht alle Radarmessungen auswertbar waren, wurde die Auswertung auf ein kleineres Feld beschränkt. 81

Abbildung 71: Darstellung der Differenzen zwischen der gravimetrisch ermittelten Entnahmefeuchten (graue Balken) und den Radarmessungen aller Messpunkte der entsprechenden Mauerwerkstypen in einem Varianzdiagramm. Rot stellen jeweils eine negative Differenz und grün eine positive Differenz dar. Über den jeweiligen Balken ist der Betrag der Differenz mit einem Richtungspfeil aufgeführt. An manchen Balken konnte keine Differenz berechnet werden, da hier kein auswertbares Signal über Radar gemessen werden konnte. [Foto: Daniel Frenzel] 82

Abbildung 72: Auswertung Gravimetrie der kleinen, konzertierten Bohraktion. Jeweils die zwei linken Bilder zeigen die Ergebnisse der gravimetrischen Feuchteermittlung. Die zwei rechten Bilder stellen die Ergebnisse der Radarmessung dar. [Foto: Daniel Frenzel] 83

Abbildung 73: Varianzdiagramm der zweiten Bohraktion. Darstellung identisch Abbildung 71. 84

Abbildung 74: Vergleich unterschiedlicher indirekter Messmethoden untereinander. A) Gann-Hydromette, B) elektrischer Widerstand über die Oberfläche, C) kleiner Mikrowellen-Messkopf, D) großer Mikrowellen-Messkopf 86

Abbildung 75: Vergleich unterschiedlicher indirekter Messmethoden untereinander. A) Gann-Hydromette, B) elektrischer Widerstand über die Oberfläche, C) kleiner Mikrowellen-Messkopf, D) großer Mikrowellen-Messkopf. [Foto: Daniel Frenzel] 86

Abbildung 76: Bilder von Bohrkernen aus dem Staatsarchiv in Nürnberg: Oben: Entnommener Bohrkern aus einem Gewölbemauerwerk (einschalig, dahinter Füllung aus Lockermaterial); Unten: Entnommener Bohrkern aus einem Sandsteinmauerwerk. Der Bohransatz befindet sich dabei jeweils links. [Foto: Daniel Frenzel] 88

Abbildung 77: Grafische Darstellung der gravimetrisch ermittelten Feuchtedaten und den Vorhersagen aus den Radarmessungen, entsprechend den Werten in Tabelle 8 für die unterschiedlichen Objekte. 89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ermittelte physikalische und feuchtetechnische Kennwerte der Baumaterialien	34
Tabelle 2: Namentliche Codierung der insgesamt 8 Mauerwerksprüfkörper	38
Tabelle 3: Übersicht der eingesetzten Messmethoden mit Angabe von Messintervall und notwendiger Messvorrichtung	39
Tabelle 4: Die in Delphin verwendeten hygrothermischen Materialkennwerte der verwendeten Baustoffe. Fett gedruckte Ziffern wurden direkt am Material gemessen und in Delphin ergänzt. Kursive Ziffern wurden nach Eingabe der gemessenen Kennwerte von Delphin automatisch angepasst. Die restlichen Messwerte basieren auf den in der Delphin-Datenbank bereits enthaltenen Werten.	41
Tabelle 5: Randbedingungen für die simulierte Situation an beiden Mauerwerksprüfkörpern.	41
Tabelle 6: Durchgeführte Wässerungs- und Trocknungszyklen an den einzelnen Mauerwerkspaaen. KNO ₂ kam bei den großen Mauerwerkkörpern nicht zum Einsatz.	45
Tabelle 7: Eigenschaften der Probekörper der Einzelsteinstudien	48
Tabelle 8: Gewichte der einzelnen Ziegelsteinmauern vor bzw. nach einem Wässerungszyklus. Das Gewicht der Ziegelmauern liegt dabei zwischen 242 kg und 244 kg. Insgesamt wurde von den Mauern zwischen 7 und 10 kg Wasser aufgenommen. Die Ziegelmauer in der orangenen Wanne ZO stellt mit einer Wasseraufnahme von 27,68 kg einen Spezialfall dar, da diese Mauer sowohl von oben als auch von unten bewässert wurde und somit deutlich mehr Wasser aufgenommen hat.	75
Tabelle 9: Zusammenstellung der Ergebnisse der ausgewählten Messpunkte. Gravimetrie und Sättigungsfeuchte wurden jeweils direkt am entnommenen Material gemessen. Der Durchfeuchtungsgrad errechnet sich aus dem Anteil der Entnahmefeuchte von der Sättigungsfeuchte. Die zwei hellblau markierten Spalten sind jeweils die Entnahmefeuchten der unterschiedlichen Messmethoden in Masseprozent.	88