

Frank Hansel, Horst Stopp
Peter Strangfeld, Torsten Toepel

**Schadensfreie Aufbesserung
des Gebäudebestandes mit
expandiertem Korkschorot
und Einblastechnologie für
zweischaliges Mauerwerk –
Materialfeuchtemessung von
Schüttgütern in Hohlraummauerwerk**

F 3186

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0526-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

**Schadensfreie Aufbesserung des Gebäudebestandes mit expandiertem
Korkschor und Einblastechologie für zweischaliges Mauerwerk -
Materialfeuchtemessung von Schüttgütern in Hohlraummauerwerk**

Schlussbericht

bearbeitet von:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Fakultät 6
FG Bauphysik und Gebäudetechnik

Dipl.-Ing.(FH) Frank Hansel
Prof.Dr.sc.techn. Horst Stopp
Dr.-Ing. Peter Strangfeld
Dipl.-Ing.(FH) Torsten Toepel

Der Forschungsbericht wurde durch Mittel der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert

(Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-16.53)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Kurzzusammenfassung

Es werden zwei etablierte Messgeräte für die Bestimmung der Materialfeuchte für die Anwendung in Wärmedämmschüttungen aus expandiertem Korkschat und Blähton in zweischaligem Mauerwerk untersucht um die Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit der Konstruktion durch eindringende Feuchte überprüfen zu können.

Es stellt sich heraus, dass die Herstellung von definierten Feuchtesätzen im überhygroskopischen Feuchtebereich für die Kalibrierung der Sonden problematisch ist. Ursache dafür ist der hydrophobe Charakter von Kork, der dazu führt, dass die Feuchteanlagerung nur an den Kornoberflächen des Schüttgutes erfolgt und sich dort durch thermische Einflüsse schnell umverteilt. Dadurch ist eine quantitative Messung nur im hygroskopischen Feuchtebereich möglich.

Das Mikrowellenmessverfahren MOIST Endo ist bei den sehr geringen Feuchtemengen im hygroskopischen Materialfeuchtebereich von Kork nicht geeignet, da äußere Einflüsse das Messsignal überlagern.

Der Streufeldkondensator der Firma Ahlborn GmbH liefert reproduzierbare Messergebnisse auch bei sehr geringen Feuchten, jedoch ist die Tiefenauflösung für die Bestimmung eines Feuchteprofils im Schüttgut unter den Randbedingungen eines zweischaligen Mauerwerks nicht befriedigend.

Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen ist die Erkenntnis, dass auf der Basis feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeiten von Wärmedämmstoffen die Entwicklung eines Messgerätes zur Bestimmung des Feuchtegehaltes der Materialien möglich wäre.

Abstract

Two established measuring instruments for the determination of the material moisture content for use in heat insulation fillings of expanded cork and expanded clay in double-shell masonry are examined in order to be able to check the deterioration of the thermal insulation of the structure by penetrating moisture.

It turns out that the production of defined moisture fractions in the overhygroscopic moisture range is problematic for the calibration of the probes. The reason for this is the hydrophobic character of cork, which leads to the fact that moisture accumulation takes place only at the grain surfaces of the bulk material and is rapidly redistributed there due to influence of heat. As a result, a quantitative measurement is possible for this material only in the hygroscopic humidity range.

The microwave measuring method MOIST Endo is not suitable for the very small amounts of moisture in the hygroscopic material moisture range of cork, since external influences superimpose the measuring signal.

The measuring instrument of Ahlborn GmbH, based on stray field capacitor provides reproducible measurement results even with very low moisture content, but the depth resolution for the determination of a moisture profile in bulk under the boundary conditions of a double-shell masonry wall is not satisfactory.

An important result of the investigations is, that a measuring device for the determination of moisture content in insulation materials could be possible on the base of the moisture-dependent thermal conductivity of the used materials.

Inhaltsverzeichnis

0 Einführung	4
1 Untersuchte Schüttgüter	6
1.1 Kork	6
1.2 Blähton	7
1.3 Sonstige Materialien	9
2 Bestimmungen von Materialfeuchten	10
2.1 Prinzipien der Materialfeuchtemessung und Auswahl geeigneter Verfahren	10
2.1.1 Prinzipien der Materialfeuchtemessung	10
2.1.2 Auswahl der verwendeten Verfahren	11
2.2 Materialfeuchtesensor FHA696GF1	12
2.2.1 Physikalische Grundlagen	12
2.2.2 Einmessung	12
2.2.2.1 Herstellung der Probekörper	12
2.2.2.2 Messungen	14
2.2.2.3 Kalibrierfunktionen	21
2.3 Moist ENDO	22
2.3.1 Physikalische Grundlagen	22
2.3.2 Einmessung	23
2.3.2.1 Herstellung der Probekörper	23
2.3.2.2 Messungen	24
2.3.2.3 Kalibrierfunktionen	30
3 Einsatz der Feuchtemessverfahren bei der wärmeschutztechnischen Aufwertung von Hohlraummauerwerk	31
4 Schlussfolgerung	32

Materialfeuchtemessung von Schüttgütern in Hohlraummauerwerk

0 Einführung

Bei der energetischen Sanierung von Bestandsbauten mit zweischaligem Mauerwerk wird das Verfüllen des vorhandenen Hohlraumes zwischen Verblendmauerwerk und der tragenden Wand mit einer Schüttdämmung zur Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstandes angewandt. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist davon abhängig, welche Feuchteverteilung sich im Dämmmaterial einstellt. Im Gegensatz zum Ausgangszustand ist zu erwarten, dass das bei Schlagregenereignissen die Verblendschale durchdringende Regenwasser tiefer in die Konstruktion eindringt. Es stellt sich somit die Aufgabe, die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit sowie die zeitliche und räumliche Feuchteverteilung im Schüttgut zu messen um den tatsächlichen Energieeinspareffekt ermitteln zu können. Hierzu sind genaue quantitative Langzeitmessungen notwendig. Der Kalibrierung geeigneter Messgeräte auf die angewandten Schüttdämmungen mit definierten Materialfeuchten kommt in diesem Rahmen große Bedeutung zu.

Die Situation auf dem Gebiet der Materialfeuchtebestimmung ist Insidern nur zu gut bekannt. Trotz umfangreicher Mittelinvestitionen in mehrstelliger Millionenhöhe durch die DFG bleiben die Ergebnisse auf dem Gebiet einer soliden, praktikablen Materialfeuchtebestimmung im Bauwesen bislang sehr bescheiden. Selbst unter Einbeziehung der Mikrowellen- bzw. TDR (Time Domain Reflectometry) – Messtechnik stehen derzeit immer noch keine verlässlichen Messmittel zur Verfügung, um das hygrische Verhalten von Umfassungskonstruktionen erfassen zu können. Das gilt insbesondere für Messaufgaben vor Ort.

Eine Vielzahl auf dem Markt befindlicher Materialfeuchtegeräte entspricht in ihren Leistungen nicht den angegebenen Parametern. Sie erfassen entweder nur unbestimmt den oberflächennahen Bereich, lassen sich nur für hygroskopische Feuchten einsetzen oder besitzen keine ausreichende Genauigkeit/ Reproduzierbarkeit und ihre Messwerte werden durch Ladungsträger (z.B. Salzionen) bzw. Metalleinlagen verfälscht.

Gerade weil sowohl thermische, akustische, mechanische und elektrische Eigenschaften von Materialien auch stofffeuchteabhängig sind, dienen diese Abhängigkeiten umgekehrt über eine Einmessung auch zur Bestimmung der Materialfeuchten. Das thermogravimetrische Absolutmessverfahren, das in der Praxis prinzipiell kein gesichertes Zeitverhalten liefern kann, dient dabei als Referenzmethode. Zwei grundsätzliche Schwierigkeiten treten bei diesen indirekten Materialfeuchtemessverfahren immer wieder negativ in Erscheinung:

- die Nichtverfügbarkeit von Probekörpern zur Einmessung mit definierter, gleichverteilter Feuchte (ein in der Institution erdachtes und durchgeführtes Experiment zum Ausgleich überhygroskopischer und hygroskopischer Feuchten liefert selbst für das überdurchschnittlich kapillaraktive Calciumsilikat mehrmonatige Ausgleichszeiten) zum Einmessen der Sensorik bei nichtlinearer Feuchteabhängigkeit und
- nichtreproduzierbares Kontaktverhalten der Fühler, das die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse in Form wechselnd wirksamer Übergangswiderstände beeinträchtigt.

Es verwundert deshalb kaum, dass bislang selbst neuere Verfahren wie TDR und klassische Geräte auf Mikrowellenbasis immer wieder in der Praxis enttäuschen. Ein langjähriger Versuch vor Ort mit sieben zeitparallel eingesetzten Feuchtemessverfahren unter Einbindung einer Neutronensonde und eines Bohrlochapplikators auf Mikrowellenbasis sowie klassischer

Messtechnik lieferte bei größter Sorgfalt sehr ernüchternde Messergebnisse mit Differenzen zwischen den Messverfahren von bis zu 30 % am gleichen Objekt zum gleichen Zeitpunkt.

Die unbefriedigenden Resultate zur Beurteilung von Maßnahmen zur Bauwerk trockenlegung sind partiell auch Ausdruck einer unzulänglichen in-situ Materialfeuchtemesstechnik. Eine Reihe von Vergleichsuntersuchungen zur Beurteilung von Trocknungsverfahren sind entweder nicht sachgerecht zu Ende geführt worden oder die Ergebnisse stehen aus vielerlei Gründen der Öffentlichkeit nicht zur Verfügung. Der Hinweis auf bereits durchgeführte Untersuchungen in beträchtlichem Umfang (z.B. eine Vielzahl von Projekten in Bayern und Mecklenburg bis hin zum deutsch-franz. Gemeinschaftsprojekt Meißner Dom) hilft wenig, da entweder anwendungsfähige Aussagen auf andere Objekte dort fehlen oder überholt sind bzw. die Untersuchungen nicht mit der erforderlichen Neutralität durchgeführt worden sind. Häufig werden Lücken aufgezeigt und die nicht immer sachdienlich durchgeführten Messreihen liefern zweideutige Ergebnisse.

Eine fehlende, praktikable Materialfeuchtemesstechnik für den Grundmauerbereich behindert und verfälscht aber nicht nur die diagnostische Arbeit, sondern befördert in letzter Konsequenz das Voranschreiten falscher und unwirksamer Sanierungsverfahren, da ein auch rechtlich abgesicherter, positiver Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen häufig die Erfassung zeitveränderlicher Materialfeuchteverteilungen meist in salzbefrachteter Umgebung erforderlich macht. Viele Entscheidungsträger sind daher häufig überfordert und volkswirtschaftliche Schäden programmiert, wenn keine Änderung der Situation eintritt.

Messwerte von Wärmeleitfähigkeiten bzw. Wärmedurchlasswiderständen ohne Information zu dem während der Messung vorhandenen Feuchtegehalt des Stoffes sind wenig aussagekräftig. Insbesondere die Wärmeleitfähigkeit vieler Wärmedämmstoffe und damit deren Wärmedämmwirkung besitzt eine stark ausgeprägte Feuchteabhängigkeit. Dieser zweifellos als nachteilig empfundene Zusammenhang lässt sich aber auch nutzen und wird in der Literatur als eine messtechnische Möglichkeit der Feuchtebestimmung seit langem ausgewiesen (s.a. Bilder 1.1-1 bis 1.3-2 sowie Kap. 4). Die technologische Umsetzung als industrielles Produkt scheiterte jedoch immer wieder, obwohl gerade dieser Zusammenhang nicht durch vorhandene Salze oder andere Zusatzstoffe in Form beweglicher Ionen – wie bei der elektrischen Leitfähigkeit – verfälscht wird.

1 Untersuchte Schüttgüter

1.1 Kork

Kork erscheint aufgrund seiner Materialeigenschaften für den Einsatz als Schüttdämmung in einem Hohlraummauerwerk besonders geeignet.

In Bild 1.1-1 ist die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Korkschat für zwei verschiedene Temperaturen dargestellt. Die Kurven sind im Rahmen des Projektes über Messungen mit dem Zweiplattenwärmeleitfähigkeitsmessgerät ermittelt worden.

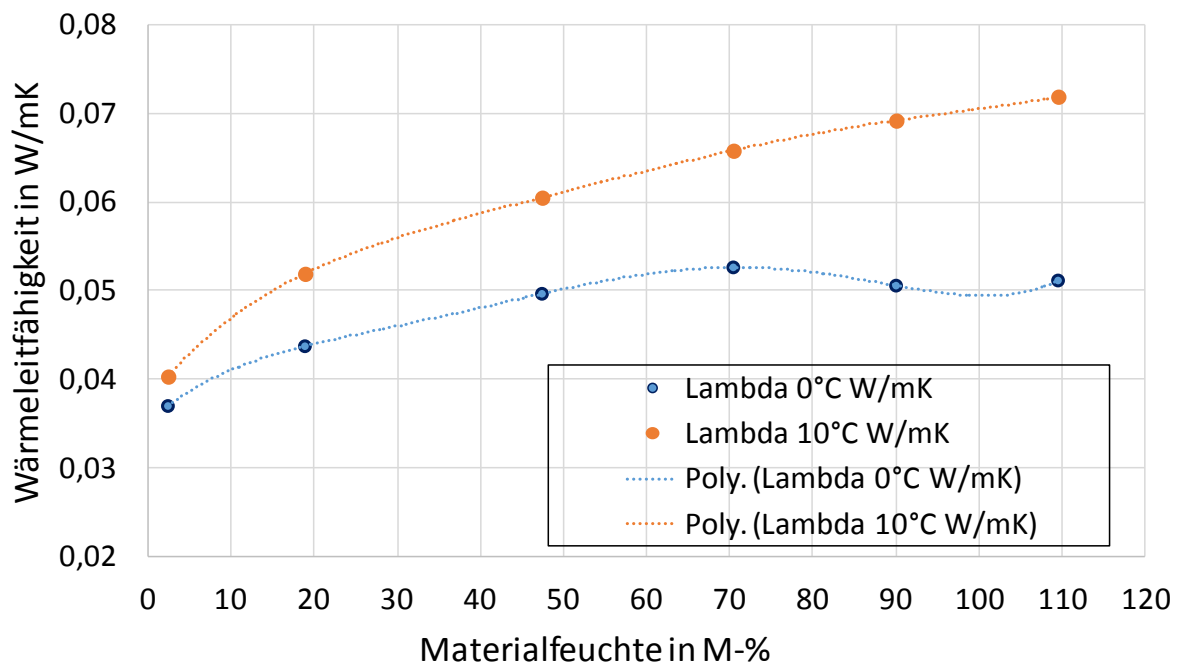


Bild 1.1-1 Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Korkschat

Bild 1.1-2 zeigt die Wasserdampfsorptionsisothermen für 5 Stichproben aus der Korkschat-Schüttung, im Sorptionsmessgerät bei 15°C aufgezeichnet. An Hand der Grafiken ist es möglich aus der im Porenlufttraum der Schüttung gemessenen relativen Luftfeuchte auf die Materialfeuchte und von dieser auf die Wärmeleitfähigkeit zu schließen. Im überhygroskopischen Feuchtebereich kann mit der gemessenen Materialfeuchte direkt aus Bild 1.1-1 die Wärmeleitfähigkeit abgelesen werden.

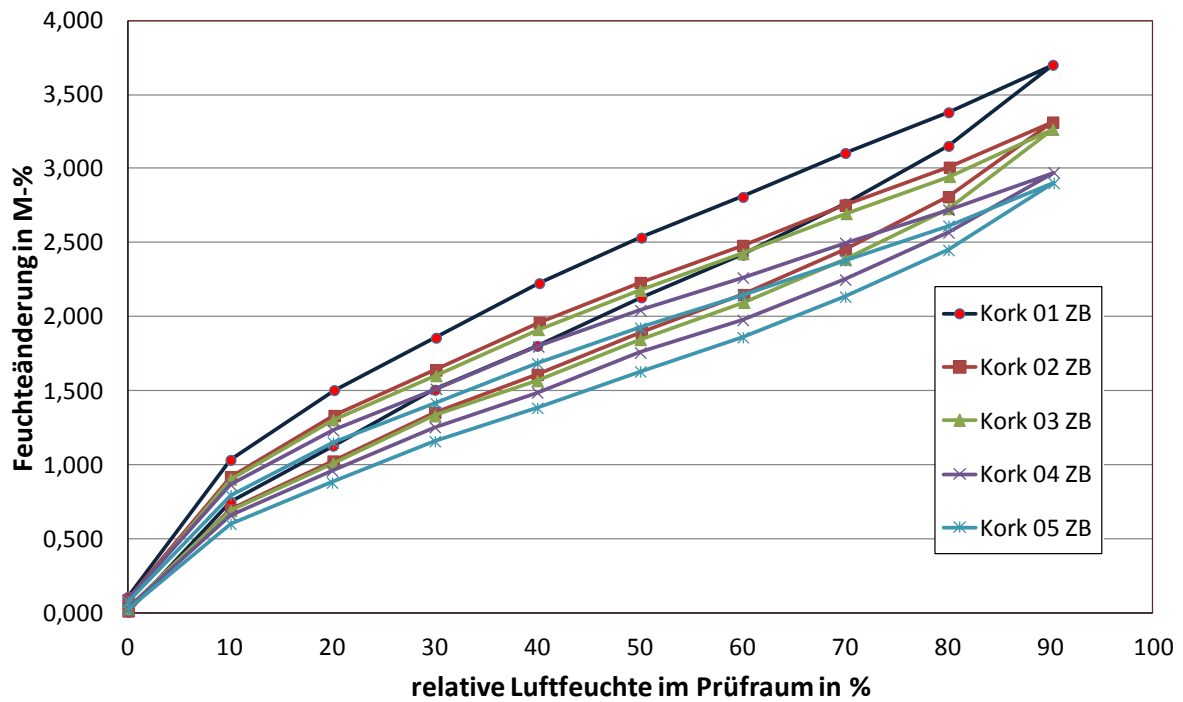


Bild 1.1-2 Wasserdampfsorptionsisotherme für Korkschrot bei 15 °C

1.2 Blähton

In Bild 1.2-1 ist die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit für einen weitgehend hydrophoben Blähton (Liapor) bei einer Temperatur von 10 °C dargestellt. Die dazugehörige Wasserdampfsorptionsisotherme findet sich für verschiedene Körnungen in Bild 1.2-2. Die Wärmeleitfähigkeit ist etwas größer als bei Kork.

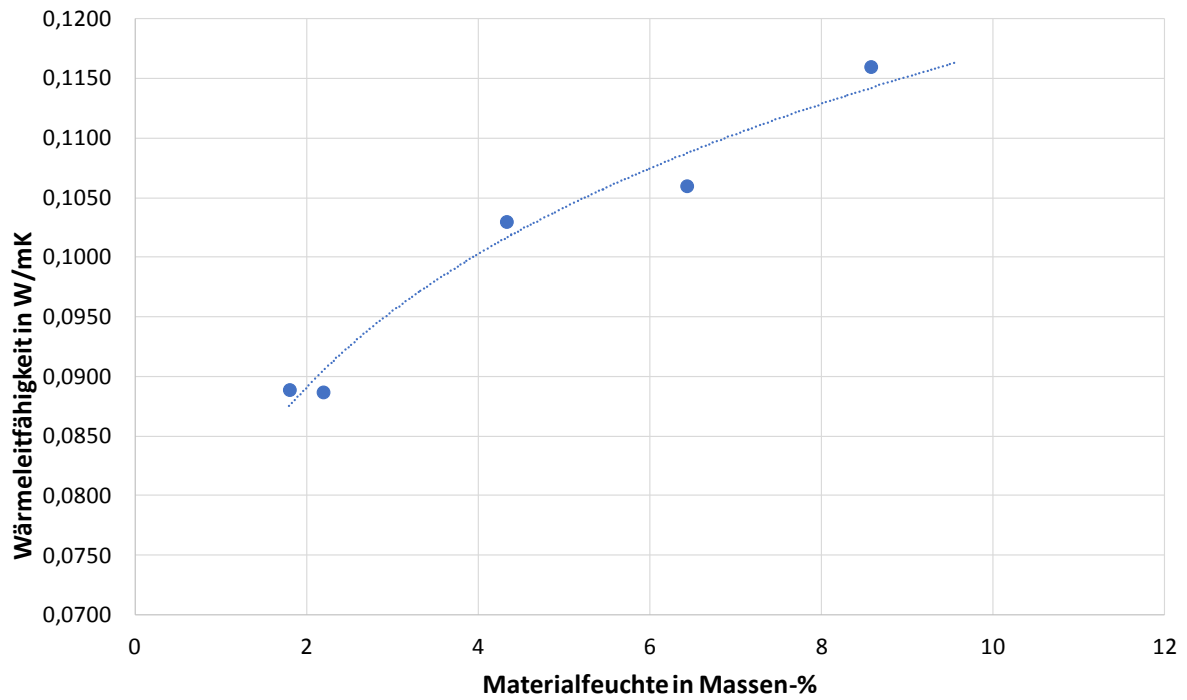


Bild 1.2-1 Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Blähton (Liapor) bei 10 °C

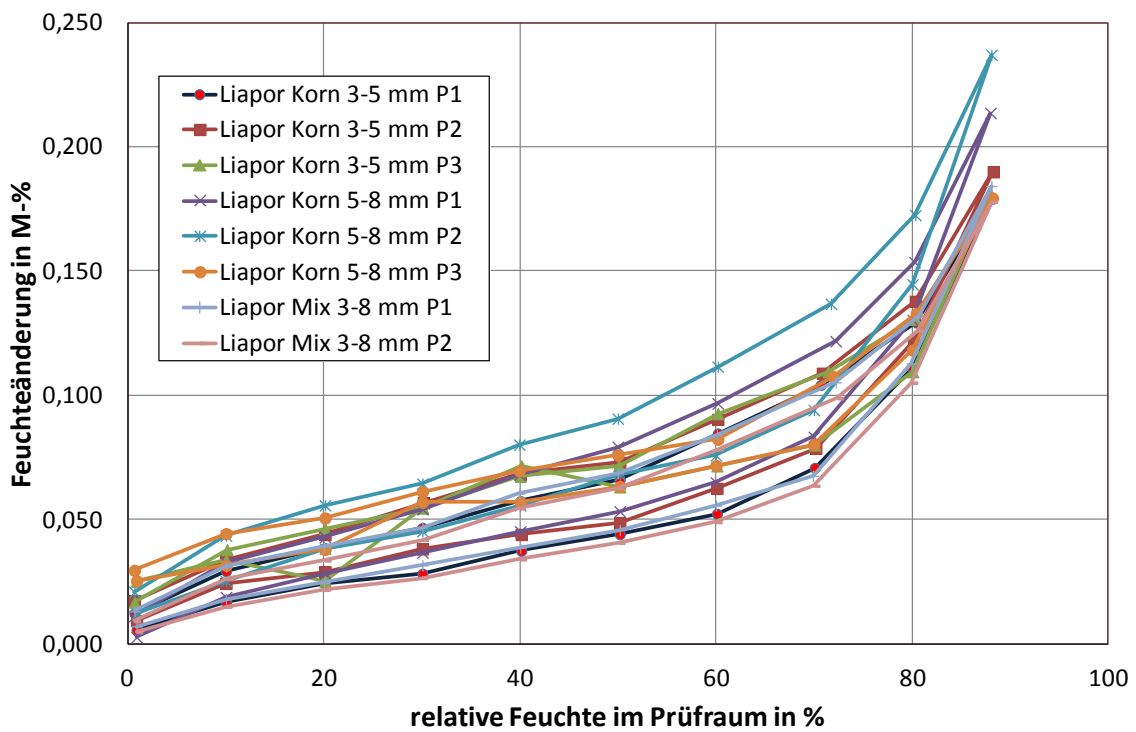


Bild 1.2-2 Wasserdampfsorptionsisotherme für Blähton (Liapor) bei 15 °C

1.3 Sonstige Materialien

Deutlich andere Werte werden für einen kapillaraktiven Blähton (Seramis) gemessen (Bild 1.3-1). Die Materialfeuchte kann hier sehr große Werte annehmen, mit einem sehr starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Ein solches Material ist als Schüttdämmung ungeeignet.

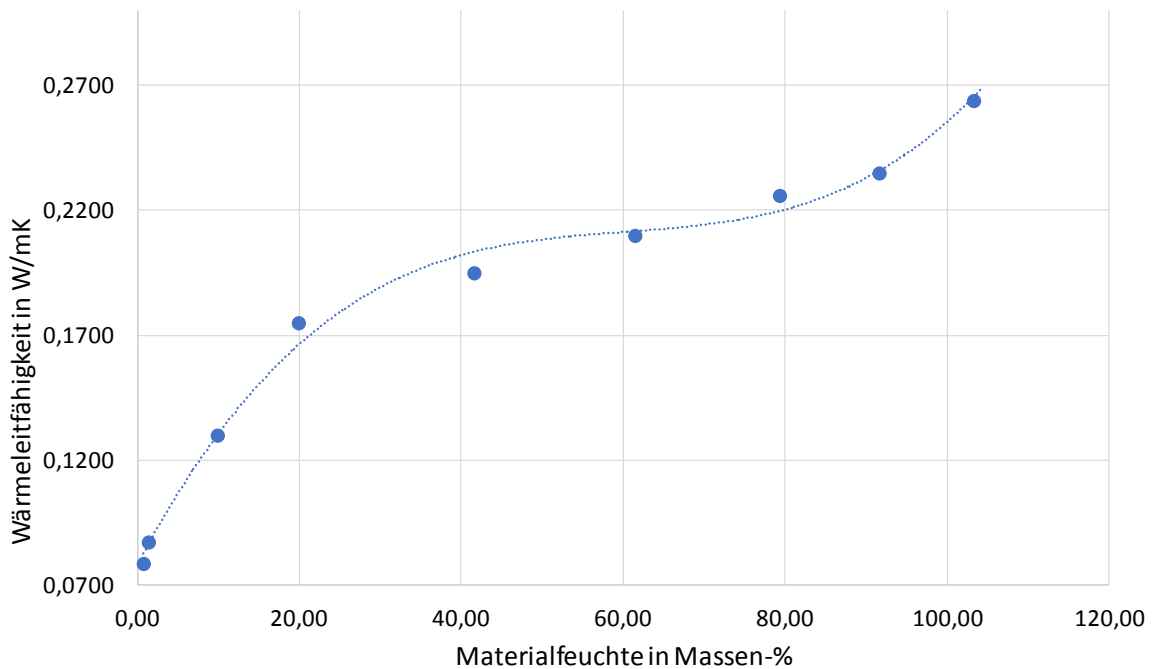


Bild 1.3-1 Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Blähton (Seramis) bei 10 °C

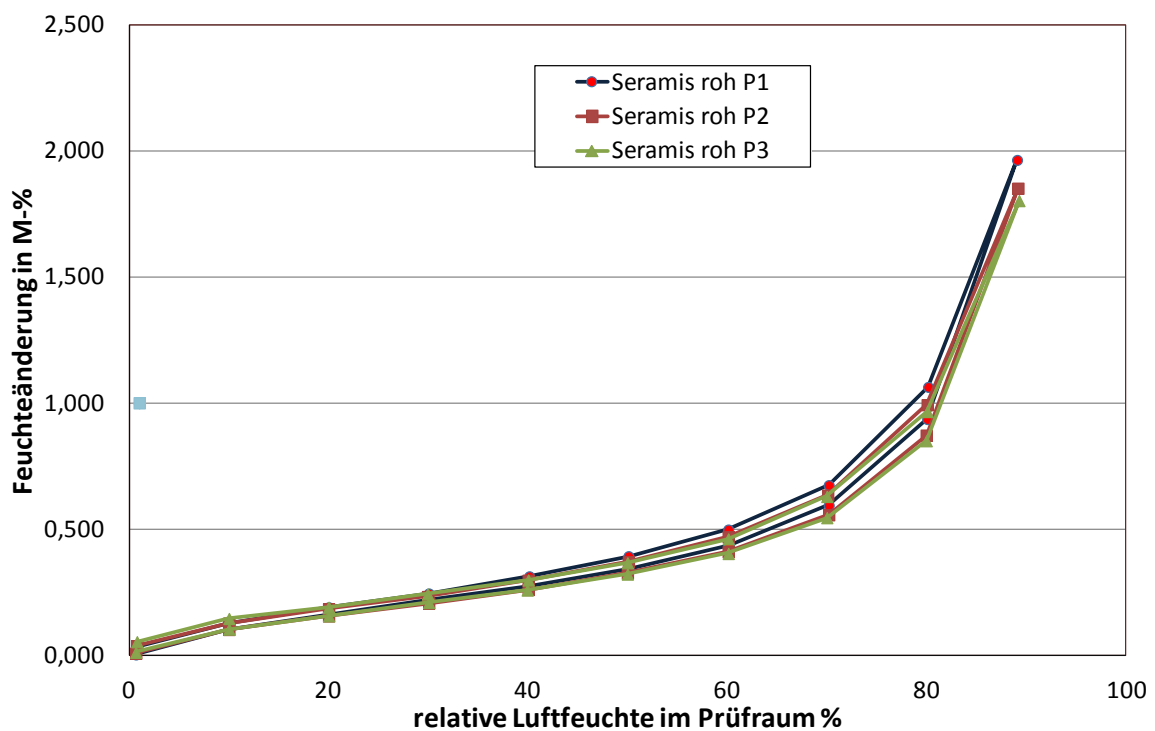


Bild 1.3-2 Wasserdampfsorptionsisotherme für Blähton (Seramis) bei 15 °C

2 Bestimmung von Materialfeuchten

2.1 Prinzipien der Materialfeuchtemessung und Auswahl geeigneter Verfahren

2.1.1 Prinzipien der Materialfeuchtemessung

Materialfeuchtemessungen werden in der Praxis qualitativ und/oder quantitativ durchgeführt. Bei der qualitativen Messung werden Aussagen über die Feuchteverteilung gewonnen. Die quantitative Messung liefert den zahlenmäßigen Wert des Feuchtegehaltes bezogen auf die Trockenmasse oder das Volumen des Baustoffes.

Es sind zahlreiche verschiedene Messverfahren in Gebrauch, deren Einsatzbereich und Aussagekraft entsprechend dem jeweils zugrundeliegenden Prinzip beschränkt ist:

Gravimetrisches Verfahren:

Es wird eine repräsentative Materialprobe entnommen und bei erhöhter Temperatur bis zum Erreichen der Massekonstanz getrocknet. Die Gewichtsänderung zwischen Ausgangs- und Endzustand wird als Wassergehalt der Probe interpretiert.

- Probeentnahme notwendig
- nicht für Stoffe mit flüchtigen Bestandteilen geeignet

Chemische Verfahren:

Es wird eine repräsentative Materialprobe entnommen und mit einer geeigneten Substanz in Kontakt gebracht. Aus dem Stoffumsatz der dadurch initiierten chemischen Reaktion kann auf die beteiligte Wassermenge und damit auf die Materialfeuchte geschlossen werden.

- Probeentnahme notwendig
- nur für pulverförmig aufbereitete Proben einsetzbar

Porenluftfeuchteverfahren:

In das zu untersuchende Material wird ein Sensor eingebracht, der die Temperatur und relative Luftfeuchte misst. Anhand einer geeigneten, im Labor gemessenen, Wasserdampfsorptionsisotherme kann aus der relativen Luftfeuchte auf den Wassergehalt des die Pore umschließenden Materials geschlossen werden.

- nur im hygrokopischen Feuchtebereich anwendbar
- Messanordnung muss sich im thermischen und hygrischen Gleichgewicht befinden

Radiometrisches Verfahren:

Auf die Materialoberfläche wird eine Isotopsonde mit Neutronenstrahler aufgesetzt. Aus der Anzahl der zurückreflektierten langsamen Neutronen kann auf die Konzentration der im Material vorhandenen Wasserstoffatome und damit auf die Materialfeuchte geschlossen werden.

- chemisch gebundener Wasserstoff beeinflusst und verfälscht den Messwert
- besondere Sicherheitsanforderungen für den Umgang mit radioaktiven Substanzen

Widerstandsverfahren:

In das Material werden Elektroden eingebracht und eine elektrische Spannung angelegt. Die gemessene Stromstärke wird als Maß für die enthaltene Feuchtigkeit interpretiert.

- der Salzgehalt des Materials beeinflusst den Messwert

Kapazitives Verfahren:

Das Material wird in das Dielektrikum eines Kondensators bewegt. Aus der Änderung von dessen Kapazität wird auf die Materialfeuchte geschlossen.

- elektrische/magnetische Fremdfelder beeinflussen den Messwert

Mikrowellenverfahren:

Eine Sonde sendet elektromagnetische Wellen in das Material und misst den Energieverlust der reflektierten Strahlung. Dieser wird als Maß für den Feuchtegehalt interpretiert.

- Hohlräume im Material beeinflussen den Messwert

Wärmeleitfähigkeitsverfahren:

Dem Material wird durch eine Heizquelle lokal Energie zugeführt. Aus der in einer bestimmten Zeit gemessenen Temperaturänderung wird auf die Wärmeleitfähigkeit geschlossen und diese in Bezug auf das trockene Material als Maß für die Materialfeuchte angesehen.

- nicht für häufige Wiederholungsmessung geeignet
- Umgebungstemperatur beeinflusst den Messwert

2.1.2 Auswahl der verwendeten Verfahren

Bedingt durch die Vorgabe einer zerstörungsfreien und wiederholbaren Materialfeuchtebestimmung in Langzeitversuchen über den Querschnitt von Außenwänden mit durch Wärmedämmschüttstoffe verfülltem Hohlraummauerwerk reduziert sich die einsetzbare Messmethodik auf wenige verfügbare Verfahren.

2.2 Materialfeuchtesensor FHA696GF1

2.2.1 Physikalische Grundlagen

Der Materialfeuchtesensor FHA696GF1 der Firma Ahlborn verwendet ein indirektes Messverfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte. Über das hochfrequente, elektrische Feld des integrierten Streufeldkondensators wird dessen Kapazität gemessen und damit die Dielektrizitätszahl bestimmt. Die Dielektrizitätszahl von Kork ist mit 1,7 sehr klein und unterscheidet sich stark von der des Wassers (ca. 80). Damit ist das Messverfahren theoretisch gut zur Feuchtedetektion in Schüttkork geeignet.

Der Sensor besteht aus dem Messkopf (Durchmesser 22 mm) und einer modular verlängerbaren Haltestange. Zur Erleichterung des Eindringens in das Schüttgut ist eine robuste Spitze aus Edelstahl montiert. Der Sensor wird an ein Handmessgerät der Almemo-Reihe von Ahlborn angeschlossen. Die Vorversuche haben gezeigt, dass nicht jeder Datenlogger geeignet ist. Für die korrekte Funktion muss eine konstante Fühlerversorgungsspannung von 9 V gewährleistet sein. Der Messradius bzw. die Eindringtiefe des Messsignales in das zu messende Material wird vom Hersteller mit 10 cm angegeben, wodurch gleichzeitig die örtliche Auflösung von Feuchtedifferenzen begrenzt wird.



Bild 2.2.1-1: Materialfeuchtesensor FHA696GF1 der Firma Ahlborn GmbH (ohne Handmessgerät)

2.2.2 Einmessung

2.2.2.1 Herstellung und Vorbereitung der Probekörper

Für die Messung des Feuchtegehaltes der Schüttstoffe werden diese entsprechend konditioniert und in speziell gefertigte und präparierte Behälter eingefüllt. Die Behälter werden aus Kunststoff gefertigt um den Einfluss der Ummantelung auf das

Dielektrikum des Streufeldkondensators gering zu halten. Die Abmessungen werden auf Grundlage der Länge und des Erfassungsquerschnittes der Sonde festgelegt. Der Innendurchmesser beträgt 38 cm, das Innenmaß der Länge 50,5 cm. Der Mantel des Probekörpers besteht aus PVC-Rohr. Der vordere Deckel ist aus Plexiglas gefertigt um eine visuelle Überprüfung auf eine eventuell entstehende Kondensatbildung zu ermöglichen. Der hintere Deckel besteht aus PVC. Nach der Befüllung werden die Deckel mit dem Grundkörper verklebt. Im vorderen Deckel wird eine verschließbare Öffnung (Durchmesser 25 mm) vorgesehen, über die die Sonde bei der Messung eingeführt werden kann. Ein Führungsrohr existiert nicht, um den Einfluss des Fremdmaterials auf das Ergebnis auszuschließen.

Es werden 4 Probekörper für die Messung von Korkschrot und 2 Probekörper für Blähton (Liapor) mit nachfolgender Bezeichnung angefertigt und vorbereitet:

- ZB 01 (Korkschrot mit Ausgleichsfeuchte im Anlieferungszustand 2,7 M-%)
- ZB 02 (Korkschrot trocken)
- ZB 03 (Korkschrot mit Feuchtegehalt 5 M-%)
- ZB 04 (Korkschrot mit Feuchtegehalt 30 M-%)
- ZB 05 (Blähton mit Ausgleichsfeuchte im Anlieferungszustand 1,8 M-%)
- ZB 06 (Blähton mit Feuchtegehalt 8,9 M-%)

Bei den Probekörpern ZB 03, ZB 04 und ZB 06 wird der Schüttstoff schichtenweise nach vorhergehender Sprühbefeuchtung (Wassermenge entsprechend dem angestrebten Feuchtegehalt berechnet) eingefüllt. Die tatsächlich zugeführte Wassermenge wird durch Wägung ermittelt. Nach jedem Einfüllvorgang wird der Behälterinhalt durch Umrühren gemischt um eine möglichst gleichmäßige Feuchteverteilung im Schüttgut zu erreichen.

Die Festlegung der Feuchtegehalte erfolgt auf Grundlage durchgeführter Vormessungen zur Feuchtespeicherfähigkeit der Schüttgüter. Ermittelt wurden folgende Eigenschaften:

- Hygroskopische Feuchteaufnahme bei 100 % rel. Feuchte:
 - Kork = 5,1 M-% (entspricht 0,3 Vol-% bei einer Schüttdichte von ca. 68 kg/m³)
 - Blähton (Liapor) = 0,7 M-% (entspricht 0,3 Vol-% bei einer Schüttdichte von ca. 370 kg/m³)
- Überhygroskopische Feuchteaufnahme (getaucht im Wasser):
 - Kork = 100 M-% (entspricht 7 Vol-% bei einer Schüttdichte von ca. 68 kg/m³)
 - Blähton (Liapor) = 50 M-% (entspricht 18 Vol-% bei einer Schüttdichte von ca. 370 kg/m³)

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Korkteilchen praktisch kein flüssiges Wasser aufnehmen. Die Feuchteanlagerung erfolgt fast ausschließlich an der Teilchenoberfläche und dürfte damit von der Siebkennlinie der Korkschüttung abhängig sein. Die hygroskopische Wasseranlagerung ist ebenfalls sehr gering. Der

Liapor-Blähton nimmt im überhygroskopischen Bereich etwas mehr Feuchte als Kork auf, ist aber trotzdem nur wenig kapillaraktiv.

Die Vorversuche zeigen, dass die Herstellung des für die Kalibrierung eines Materialfeuchtesensors erforderlichen Feuchteausgleichs im hydrophoben Schüttgut (insbesondere Kork) problematisch ist. Das an der Kornwandung haftende Flüssigwasser neigt einerseits aufgrund von Schwerkräfteinfluss dazu abzutropfen. Zum anderen ist beim Feuchtetransport der geringe Diffusionswiderstand des Luftraumes der Schüttung maßgeblich wirksam, wodurch Entmischungsprozesse infolge thermischer Einflüsse fast ungehindert stattfinden können. Bei Abkühlung der Behälterwandung unter die Taupunkttemperatur scheidet sich an dieser (aus dem im Luftraum der Schüttung befindlichen Wasserdampfanteil) flüssige Phase ab. Dadurch entsteht ein Dampfdruckgefälle innerhalb der Schüttung, welches bewirkt, dass die an dem Schüttgut haftende flüssige Phase verdunstet und zu Behälterwand transportiert wird, wo sie wieder kondensiert. Ein Rücktransport der flüssigen Phase in das Schüttgut und die Wiederherstellung der alten Feuchteverteilung ist praktisch nicht möglich, da hierfür das Schüttgut unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden müsste. Die relative Luftfeuchte in der überhygroskopisch befeuchteten Schüttung beträgt 100%. Deshalb genügen kleinste Temperaturänderungen im Umgebungsraum des Probekörpers, den thermisch induzierten Entmischungsprozess in Gang zu setzen.

Um den Einfluss der Entmischung durch den Schwerkräfteinfluss zu reduzieren, werden die eingebrachten Feuchtemengen und damit die an den Materialkörnern entstehenden Wassertropfen klein gehalten. Die Vormessungen haben gezeigt, dass es am günstigsten ist, die Lagerung der Probekörper in einem Kellerraum mit einer im Jahresgang weitgehend konstanten Innenraumtemperatur unter bestmöglichem Ausschluss von natürlichen und künstlichen Wärmestrahlungseinflüssen durchzuführen. Aufgrund von Größe und Gewicht der Probekörper war es nicht möglich, diese in der Klimaprüfkammer zu lagern.

2.2.2.2 Messungen

Im Gegensatz zur Messung mit MOIST Endo, die in einem Hülsrohr stattfindet, beeinflusst der Gebrauch der Ahlborn-Feuchtesonde die Schüttung im Probekörper. Bei jeder Messung tritt unvermeidbar ein gewisser Verlust an Material auf, der aufgrund der Sondenform und der elektrostatischen Anziehung (bei Kork) beim Herausziehen aus dem Probekörper transportiert wird. Eine Wiedereinfüllung durch die enge Bohrung ist aufgrund des Innendruckes der Schüttung nicht möglich. Deshalb muss die Anzahl der Messungen auf das erforderliche Minimum beschränkt werden. Durch den Gebrauch der Sonde wird das Schüttgut lokal beim Einschub vor der Sonde verdrängt, komprimiert und teilweise mechanisch zerkleinert (bei Blähton). Die Adhäsionskräfte zwischen den Korkteilchen behindern ein zurückrutschen in die Ausgangsposition nach dem Herausziehen der Sonde. Dadurch entstehen

unregelmäßige Hohlräume in der Schüttung, die sich bei jeder Messung anders ausbilden.

In Bild 2.2.2.2-1 sind vier Profilmessungen am Probekörper ZB03 (Korkschröt mit Feuchtegehalt 5 M-%) dargestellt. Die blaue Säulenreihe stellt den gemessenen Zustand bei erstmaliger Verwendung der Ahlborn-Feuchtesonde dar. Die Profilmessung zeigt eine stark inhomogene Feuchteverteilung an, bei der das Maximum am vorderen Probekörperdeckel liegt. Aufgrund fehlender Erfahrung mit dem Messverfahren und der Tatsache, dass MOIST Endo in seinem Genauigkeitsbereich keine derartige Inhomogenität anzeigt (Bild 2.3.2.2-3) wird der Probekörper geöffnet und der Inhalt neu durchmischt. Dabei wird festgestellt, dass keine Kondenswasserbildung an den Behälterwänden vorhanden ist. Die rote Säulenreihe zeigt das Messergebnis einen Tag nach dem Verschließen und Abdichten. Die grüne und lilafarbene Säulenreihe wurden anschließend in Abständen von je einem Monat aufgezeichnet. Deutlich zu erkennen ist der Effekt der Durchmischung mit einer nachfolgenden langsamen Vergleichmäßigung der Messwerte. Daraus kann geschlossen werden, dass es sich tatsächlich um Feuchteinhomogenitäten innerhalb der Korkschröt handelt und dass diese mit der Ahlborn-Sonde detektierbar sind.

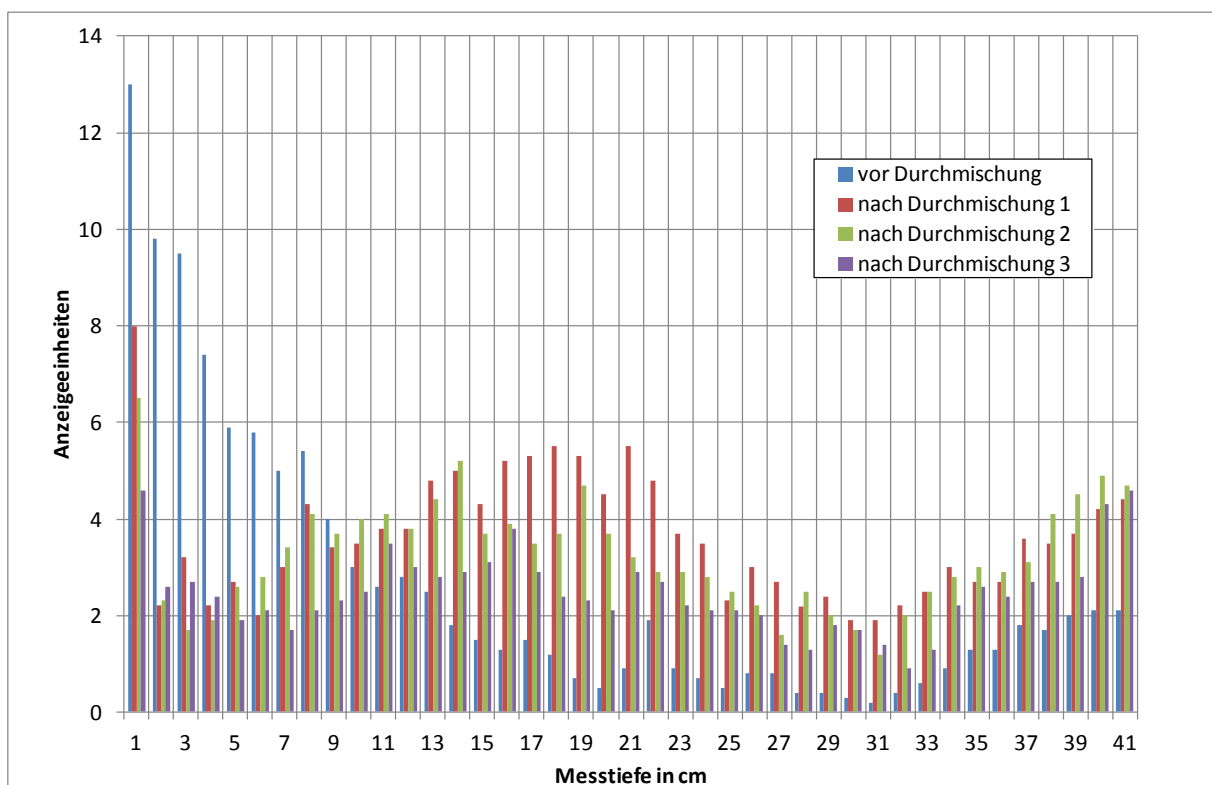


Bild 2.2.2.2-1: Profilmessung Probekörper ZB03 (Korkschröt Feuchtegehalt 5 M-%)

Das Bild 2.2.2.2-2 zeigt die erste Feuchteprofilmessung mit der Ahlborn-Feuchtesonde für alle vier Probekörper. Deutlich erkennbar ist, dass die Geräteanzeige mit zunehmender Materialfeuchte höher liegt. Die Feuchte in den

Probekörpern ZB01 (Korkschat Ausgleichsfeuchte) und ZB02 (Korkschat trocken) erscheint weitgehend gleichverteilt. Bei den beiden höher befeuchteten Materialproben sind deutliche Inhomogenitäten erkennbar.

In Bild 2.2.2.2-3 ist die entsprechende Feuchteprofilmessung nach 6 Monaten dargestellt. Bei Probekörper ZB03 (Korkschat Feuchtegehalt 5 M-%) liegt nun auch eine weitgehende Gleichverteilung vor, während bei Probekörper ZB04 (Korkschat Feuchtegehalt 30 M-%) immer noch eine starke Inhomogenität vorliegt. Im Kern dieses Behälters ist eine gewisse Vergleichmäßigung erkennbar, in den Randbereichen scheint aber eine Entmischung stattgefunden zu haben. Optisch ist am vorderen Deckel von ZB04 Kondenswasser sichtbar.

Wie in beiden Grafiken erkennbar wird, liegen große Differenzen der vom Gerät angezeigten Absolutwerte zwischen Ausgangs- und Endzustand vor. Diese Erscheinung hat u.a. ihre Ursache darin, dass sich der Nullpunkt des Gerätes im Laufe der Zeit immer weiter in den negativen Bereich verschiebt. Im praktischen Gebrauch lässt sich der Mangel beheben, indem bei jeder Messung zusätzlich der Messwert in freier Luft erfasst wird und bei der Auswertung als Korrekturwert dazugerechnet wird.

Die in Blätton gemessenen Feuchteprofile sind für zwei Zeitpunkte in den Bildern 2.2.2.2-4 und 2.2.2.2-5 dargestellt. Hier ist die eine entsprechende Nullpunktkorrektur bereits berücksichtigt.

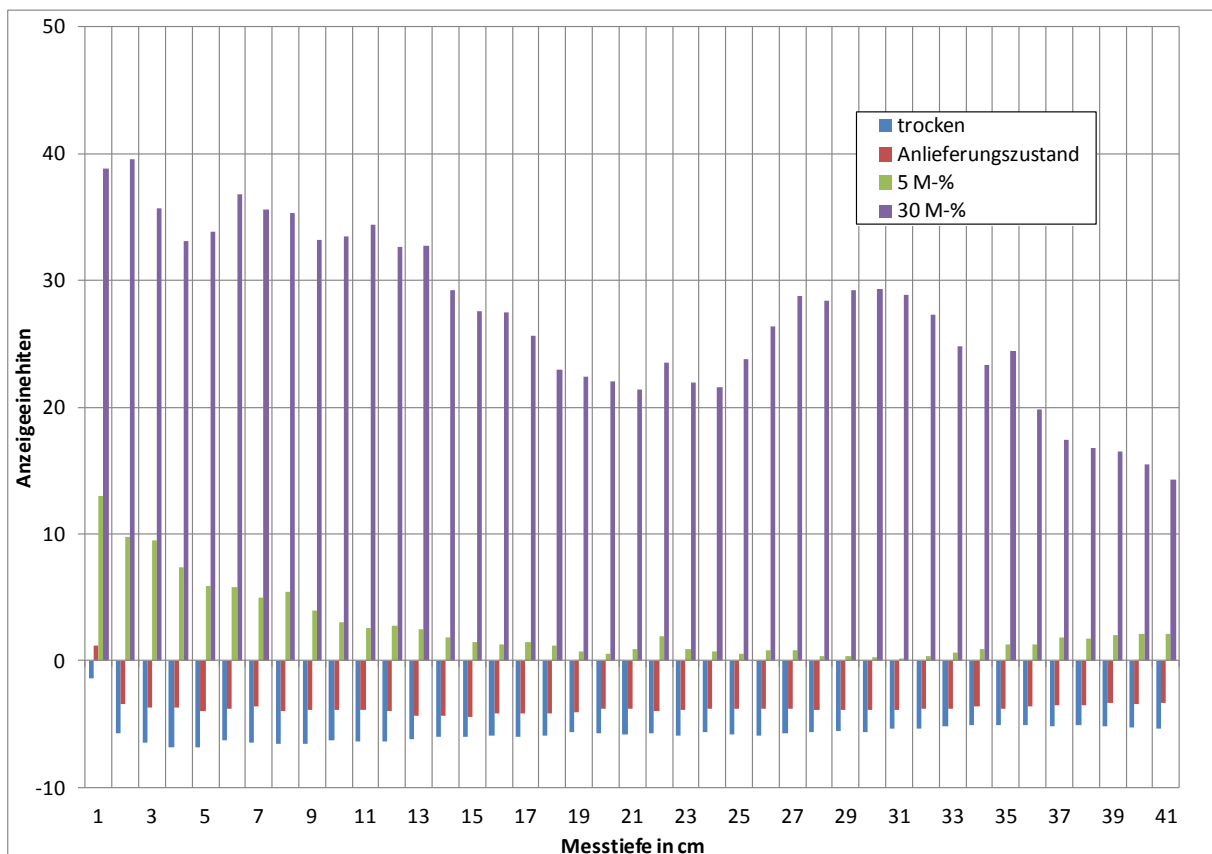


Bild 2.2.2.2-2: Feuchteprofilmessung Ausgangszustand (ohne Nullpunktkorrektur)

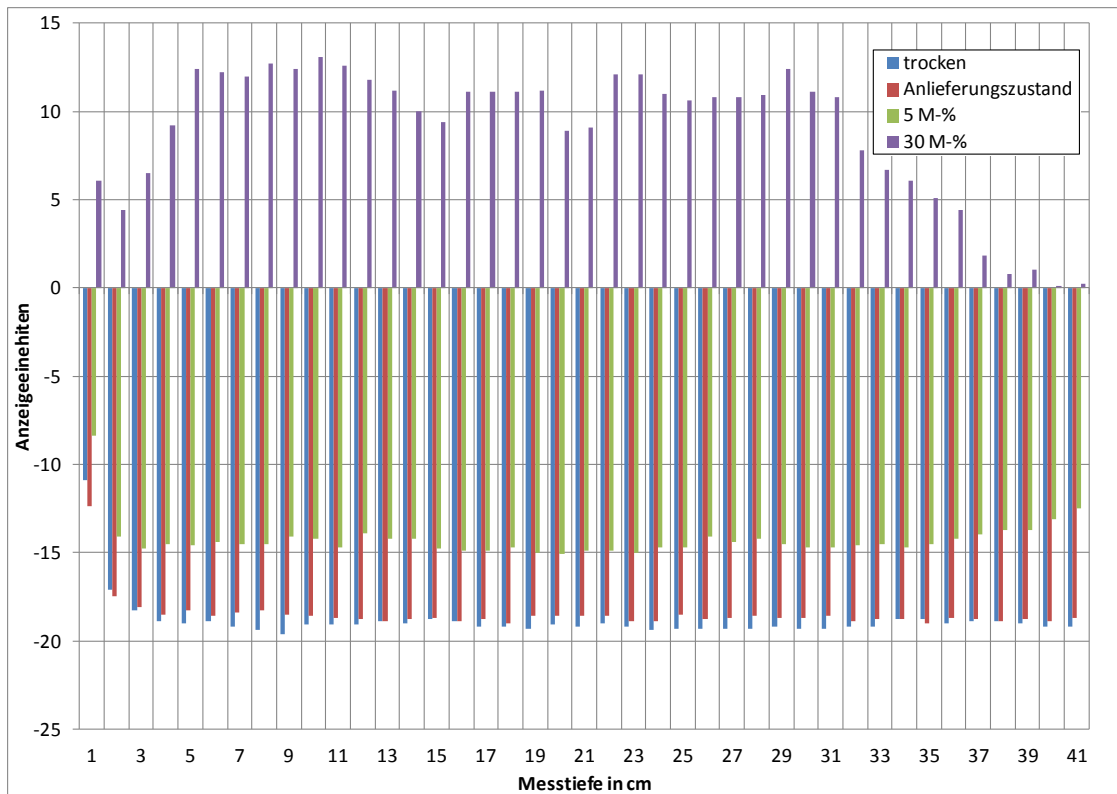


Bild 2.2.2.2-3: Feuchteprofilmessung vorläufiger Endzustand (ohne Nullpunkt Korrektur)

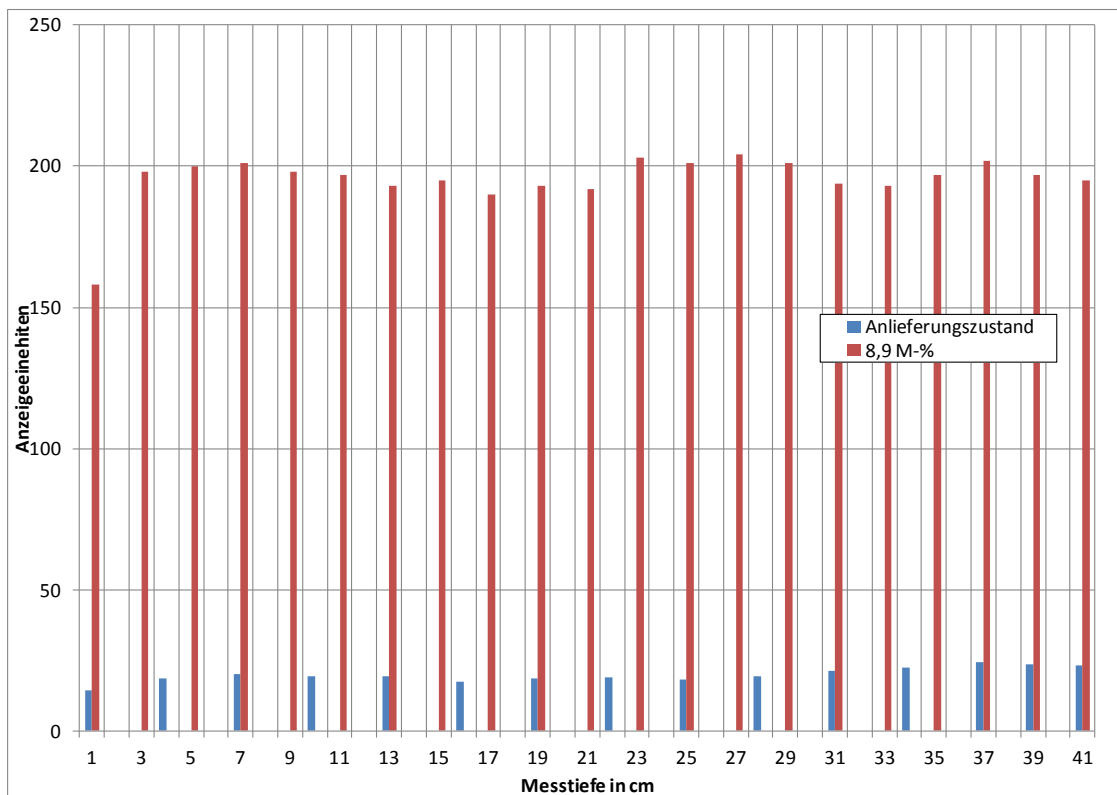


Bild 2.2.2.2-4: Gegenüberstellung der mit Ahlborn-Materialfeuchtesensor FHA696GF1 ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Juni 2018

Um die Tiefenauflösung des Sensors zu bestimmen werden zwei Probekörper aus Calziumsilikat mit einer Querschnittfläche von 25 cm x 25 cm und einer Dicke von 11 cm angefertigt und mit einer mittig angeordneten Kernbohrung von 2,4 cm Durchmesser versehen. Die beiden Probekörper werden so positioniert, dass die Bohrungen eine durchgehende Führung für die Sonde bilden. Durch verschiedene Abstände der beiden Körper zueinander kann ein variabler Luftspalt zwischen diesen gebildet werden. Da sich die Dielektrizitätskonstanten von Luft und Calziumsilikat unterscheiden wird so eine scharf abgegrenzte Feuchteinhomogenität im Körper imitiert.

Die Feuchtesonde wird in Zentimeterabständen in die Führungsbohrung eingeführt. Die Messung beginnt wenn die aktive Sondenoberfläche vollständig vom Material umschlossen ist (Einstecktiefe 5 cm, gemessen von der Trennisolierung der Spitze aus) erreicht ist.

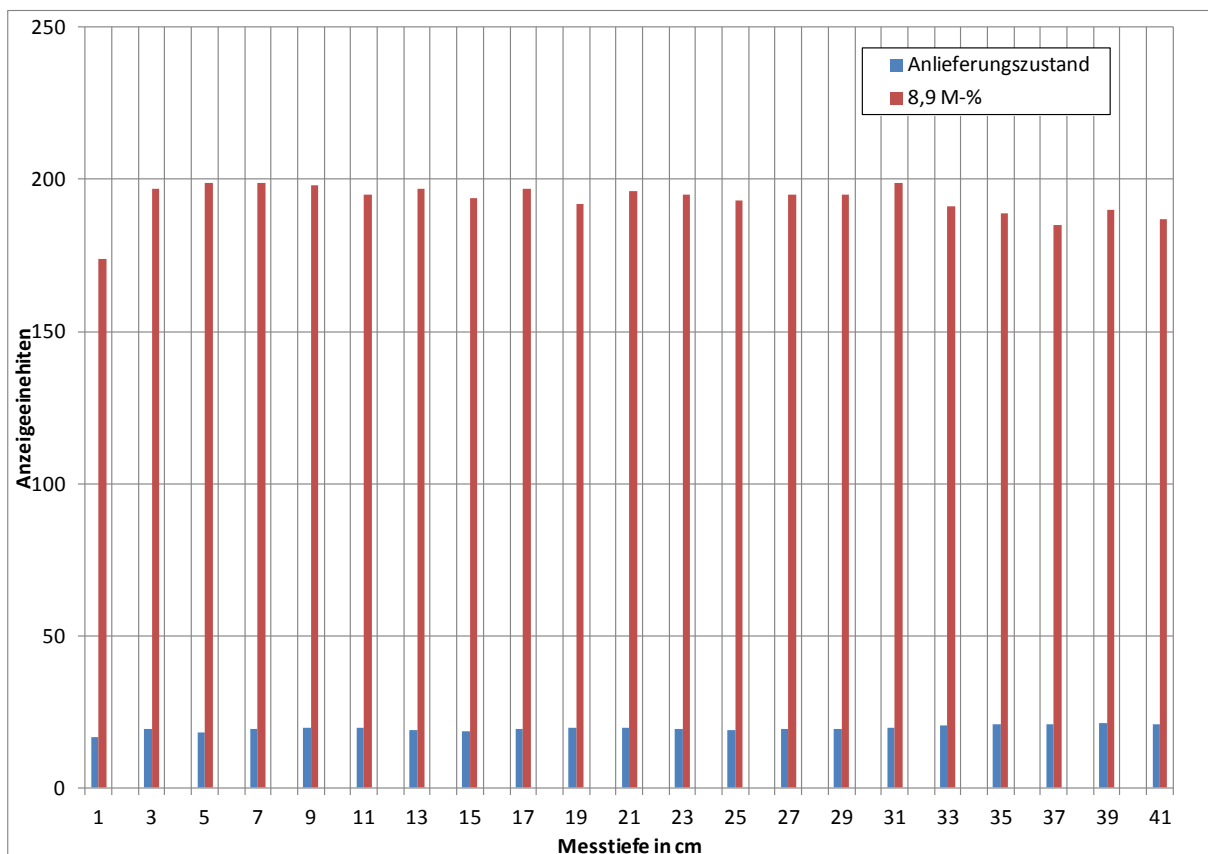


Bild 2.2.2.2-5: Gegenüberstellung der mit **Ahlborn**-Materialfeuchtesensor FHA696GF1 ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Oktober 2018

Bild 2.2.2.2-6 zeigt das Ergebnis für den Fall, dass sich kein Luftspalt zwischen den beiden Probekörpern befindet. Bei der Einstecktiefe von 5 cm wird das Messergebnis

offensichtlich noch von der Umgebungsluft beeinflusst. Die Sonde muss also wenigstens 6 cm eingesteckt werden um Umgebungseinflüsse auf das Messergebnis auszuschließen. Bei einer Einstecktiefe von 22 cm tritt die Trennisolierung zwischen Spitze und Messbereich auf der Gegenseite aus dem Probekörper aus. Hier tritt wieder der Einfluss der Umgebung auf das Messergebnis zu Tage. Während sich der Messkopf vollständig im Material befindet streuen die Messwerte um maximal 6 Anzeigeeinheiten.

In Bild 2.2.2.2-7 besteht nun eine Inhomogenität, ausgedrückt durch einen Luftspalt von 2 cm Breite. Die Sonde zeigt dies deutlich an, jedoch ist die geometrische Größenabbildung nicht korrekt. Der scharfe Profilwechsel wird verwischt. Ursache dafür ist die Länge des aktiven Messbereiches, der mit 5 cm deutlich größer als die zu detektierende Inhomogenität ist. Der Messkopf ist immer teilweise vom Material umschlossen, daher sind alle erfassten Messwerte Mischwerte. Der absolute Messwert der Inhomogenität ist somit nicht feststellbar.

In Bild 2.2.2.2-8 ist der Luftspalt auf 5 cm Dicke vergrößert. Die Inhomogenität wird mit nahezu der gleichen geometrischen Abmessung wie beim 2 cm Luftspalt detektiert, jedoch liegt nun das Minimum deutlich tiefer. Auch in diesem Fall wird der absolute Wert als Mischwert angezeigt und liegt deutlich über dem zu erwartenden Messwert für Luft von -10 Anzeigeeinheiten.

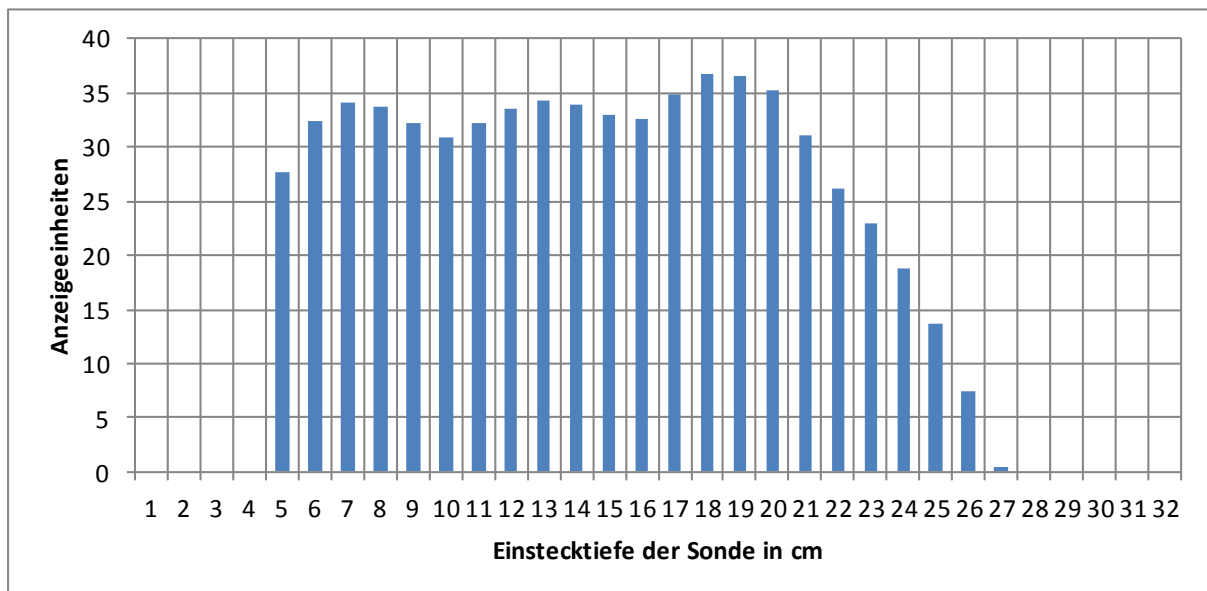


Bild 2.2.2.2-6 Messprofil in 22 cm dickem, homogenen Calciumsilikat-Körper

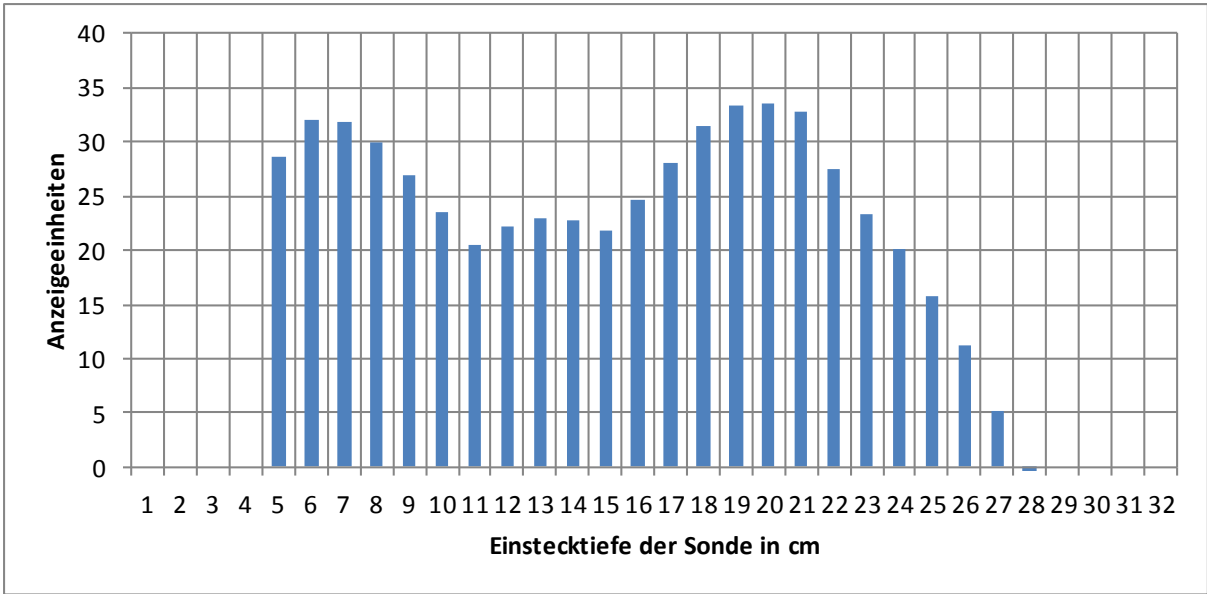


Bild 2.2.2.2-7 Messprofil in 2 x 11 cm dicken Calziumsilikat-Körpern mit zwischenliegendem Luftspalt 2 cm

Als Fazit bleibt festzuhalten: Mit der Sonde können Inhomogenitäten zwar erkannt, aber quantitativ nicht korrekt abgebildet werden. Der Absolutwert an der Störstelle könnte nur bei konstanter Größe auf einem Bereich größer 7 cm festgestellt werden, dies ist bei der realen Feuchtemessung kaum zu erwarten. Die geometrische Abmessung ist aber auch in diesem Falle nicht genau zu erkennen. Dafür müsste die Inhomogenität vielfach größer als die Länge des aktiven Messkopfes sein.

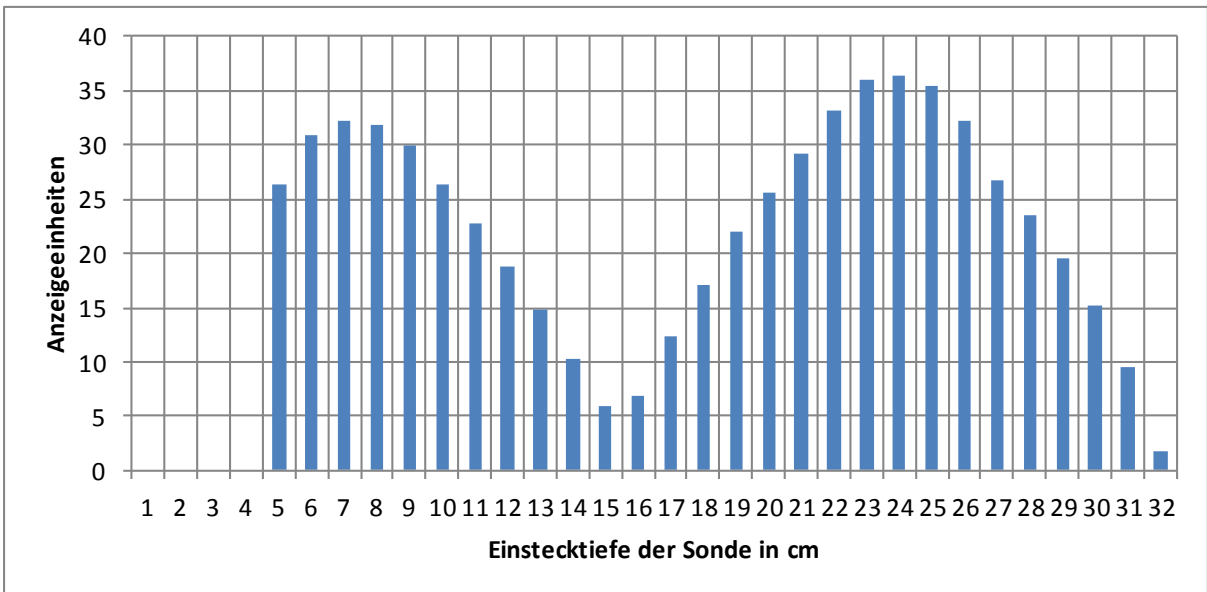


Bild 2.2.2.2-8 Messprofil in 2 x 11 cm dicken Calziumsilikat-Körpern mit zwischenliegendem Luftspalt 5 cm

2.2.2.3 Kalibrierfunktionen

Die in Bild 2.2.2.3-1 und 2.2.2.3-2 dargestellten Kalibrierfunktionen gelten für einen Bezugsnullpunkt des ausgelieferten Gerätes in freier Luft von -11,6 Anzeigeeinheiten. Abweichungen davon müssen bei der Anwendung der Kalibrierfunktionen als positiver oder negativer Korrekturwert zum ermittelten Feuchtegehalt addiert werden.

Um die Anzahl der Messpunkte zu erweitern wird für jeden Probekörper ein weiteres Feuchtegleichgewicht durch Feuchteanlagerung bzw. Abtrocknung hergestellt. Diese weiteren Referenzpunkte ergeben sich nach kontrollierter Öffnung der Behälter und einer damit bewusst herbeigeführten Änderung des Feuchtegehaltes.

Die in Bild 2.2.2.3-1 dargestellte Kalibrierfunktion ergibt sich, wenn alle vier Probekörper als gültige Referenzpunkte betrachtet werden. Leider ist die Feuchte in ZB04 (Korkschrot Feuchtegehalt 30 M-%) stark inhomogen verteilt und es ist Kondenswasser am Probekörperdeckel erkennbar. Die tatsächliche Materialfeuchte von 30 M-% ist deshalb zu hoch angenommen. Die Lage der anderen Messpunkte bestätigt dies, da die lineare Trendkurve bei Vernachlässigung von ZB04 deutlich flacher verläuft.

Letzterer Fall ist in Bild 2.2.2.3-2 dargestellt. Der Messpunkt für 30 M-% ist hier aus dem Verlauf der anderen Probekörper extrapoliert. Aus dem Trendverlauf lässt sich ein mittlerer tatsächlicher Feuchtegehalt im Probekörper ZB04 von ca. 20 M-% prognostizieren.

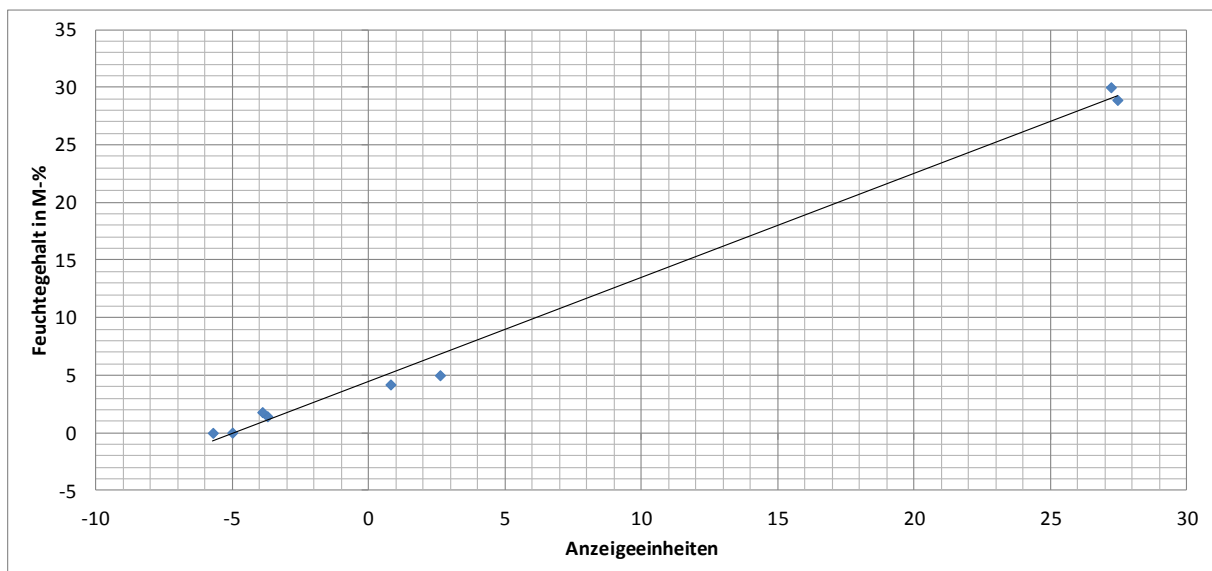


Bild 2.2.2.3-1 Kalibrierfunktion für Ahlborn-Feuchtesonde unter Berücksichtigung aller 4 Probekörper

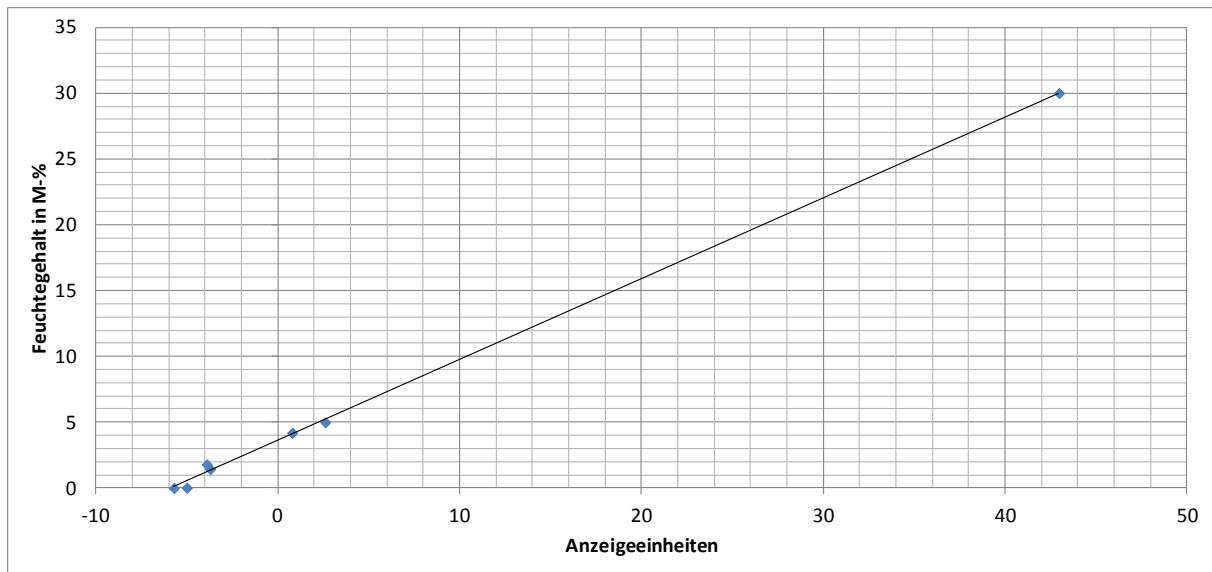


Bild 2.2.2.3-2 Kalibrierfunktion für Ahlborn-Feuchtesonde ohne Berücksichtigung von ZB04

2.3 Moist ENDO

2.3.1 Physikalische Grundlagen

Das Mikrowellen-Messgerät MOIST 350 B mit Bohrlochapplikator ENDO der Firma hf sensor nutzt die Beeinflussung elektromagnetischer Wellen in einem Dielektrikum zur Bestimmung der Materialfeuchte. Die von der Sonde ausgesandten Wellen werden von dieser nach der Reflektion im Dielektrikum wieder empfangen. Die gemessenen energetischen Verluste sind ein Maß für die Dielektrizitätszahl des Materials. Bei bekannter Dielektrizitätszahl des trockenen Mediums kann so die Materialfeuchte bestimmt werden. Das Verfahren beruht somit auch auf der besonders großen Dielektrizitätszahl von Wasser im Vergleich zu anderen Stoffen und müsste auch bei Kork gut anwendbar sein. Der Messradius bzw. die Eindringtiefe des Messsignales in das zu messende Material wird vom Hersteller mit max. 4 cm angegeben.

Das Messverfahren weist eine recht große Streuung der Einzelmesswerte auf. Das Messgerät wird daher so eingestellt, dass 5 aufeinanderfolgende Einzelmessungen zu einem resultierenden Messwert gemittelt werden.



Bild 2.3.1-1: Materialfeuchtesensor MOIST ENDO der Firma hf sensor GmbH (ohne Handmessgerät)

2.3.2 Einmessung

2.3.2.1 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper sind, wie in 2.2.2.1 beschrieben, gefertigt. Zusätzlich ist ein verschließbares Führungsrohr aus Acrylglas eingeklebt. Dieses Material soll nach Aussage des Herstellers die Messung nicht beeinflussen. Das Rohr dient als Führung der Sonde und verhindert gleichzeitig eine Beeinflussung der Schüttung durch das Einschieben. Das Führungsrohr ist mit Bohrungen versehen. Diese sollen es ermöglichen im hygroskopischen Bereich Kontrollmessungen mit einem Luftfeuchtesensor vorzunehmen. Aufgrund des Sondendurchmessers war es nicht möglich ein passgenaues Hülsrohr zu beschaffen. Das resultierende Spiel der Passung (abweichender Durchmesser) wirkt sich negativ auf die Lagestabilität des Sensors aus und vergrößert die auftretenden Messungenauigkeiten.

2.3.2.2 Messungen

Probekörper ZB02 (Korkschrot trocken)

Bild 2.3.2.2-1 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse der am Probekörper ZB02 (trocken) vorgenommenen Feuchteprofilmessungen mit dem Sensor MOIST Endo. Die durch die blauen, roten und grünen Säulen dargestellten Messreihen sind in kurzen zeitlichen Abständen nach Fertigstellung des Probekörpers aufgezeichnet worden. In dem entsprechenden Messzeitraum von ca. 10 Tagen hat sich die Masse des Probekörpers nicht verändert, es ist also keine Feuchte über Undichtigkeiten in den Probekörper gelangt. Die Abweichungen der drei Säulenreihen können ihre Ursache somit nur in Messungenauigkeiten oder einer Änderung der Feuchteverteilung im Korkschrot haben. Letzteres scheidet in dem vorliegenden Fall aus, da das Material in getrocknetem Zustand vorliegt. Insbesondere bei der maximalen Einschublänge tritt eine große Streuung der Messwerte auf, die vermutlich in einer veränderten Lage des Sensors im nicht ganz passgenauen Führungsrohr ihre Ursache hat.

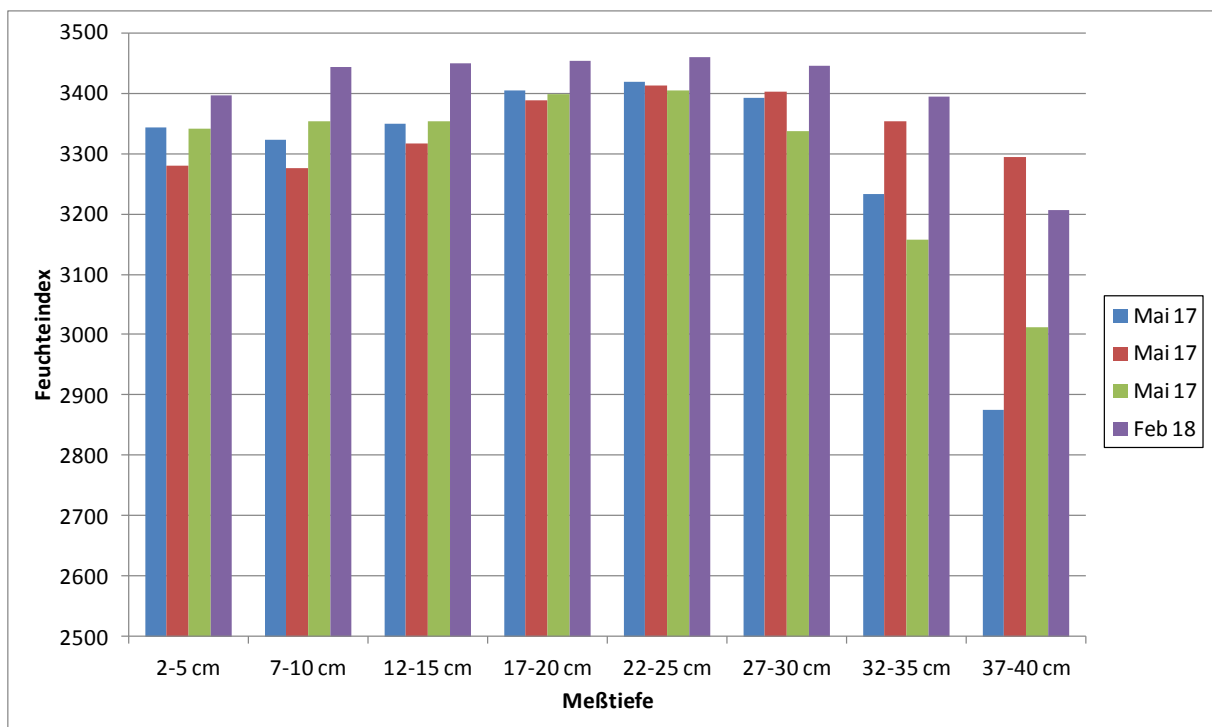


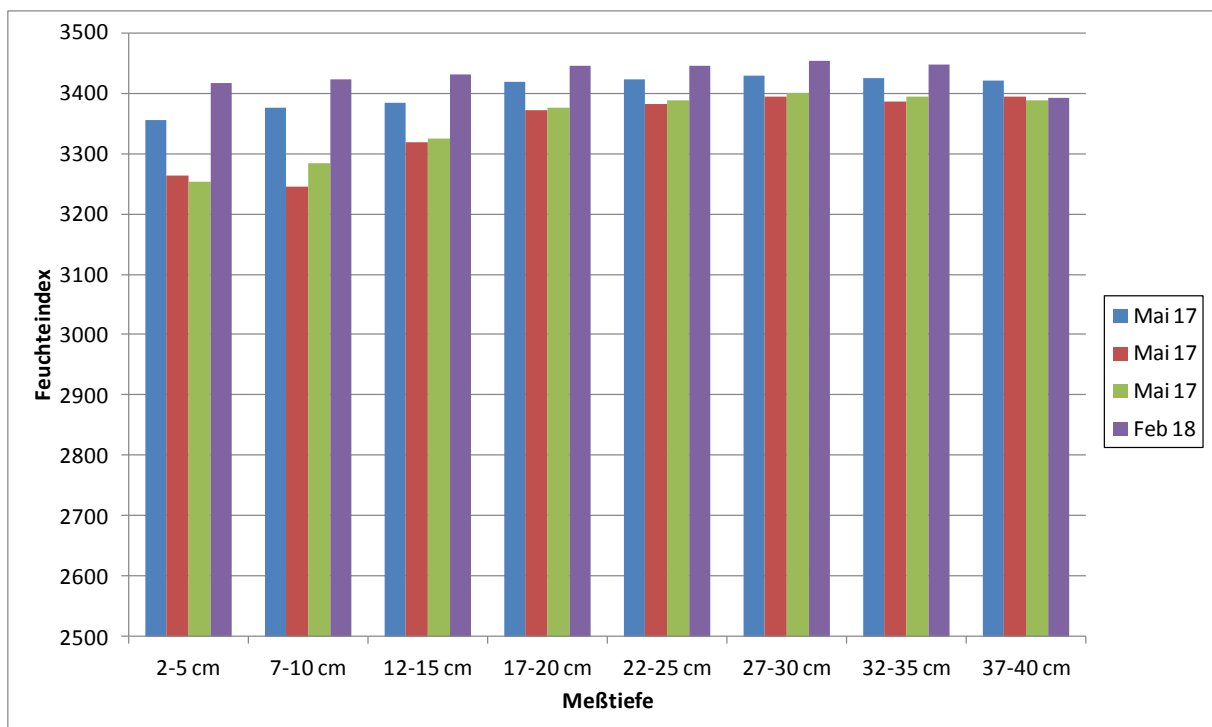
Bild 2.3.2.2-1: Profilmessung Probekörper ZB02 (Korkschrot trocken)

Die lilafarbige Säulenreihe stellt die nach ca. 10 Monaten festgestellt Feuchteverteilung dar. Die Messwerte zeigen eine Feuchteindexerhöhung im Korkschrot an. Die Überprüfung der Masse des Probekörpers ergibt, dass die Masse des Probekörpers durch Feuchteanlagerung über Undichtigkeiten um 7 Gramm erhöht hat, was einer Erhöhung des Feuchtegehaltes im Material von 0,0 M-% auf

0,2 M-% entspricht. Die Messgeräteeanzeige täuscht dagegen in diesem Falle eine Abtrocknung vor.

Probekörper ZB01 (Korkschrot Ausgleichsfeuchte)

Bild 1.2-1 zeigt die Profilmessungen für den Probekörper mit dem vor der Befüllung bei Raumluft-feuchte gelagerten Korkschrot. Die ersten drei Säulenreihen beziehen sich wieder auf einen Messzeitraum, in dem sich die Masse des Probekörpers nicht verändert hat. Die absoluten Werte des vom Sensor angezeigten Feuchteindex unterschieden sich nicht markant von denen des Probekörpers ZB02, scheinen aber tendenziell etwas darunter zu liegen.



2.3.2.2-2: Profilmessung Probekörper ZB01 (Korkschrot Ausgleichsfeuchte)

Die über einen Zeitraum von 10 Monaten aufgezeichnete Messreihe zeigt tendenziell eine Vergrößerung des Feuchteindex an. Die gemessene Masse des Probekörpers ist um 13 Gramm angestiegen, die mittlere Materialfeuchte entsprechend von 1,4 M-% auf 1,8 M-%. Wie bei Probekörper ZB02 widersprechen sich hier die Ergebnisse der Messung und die der Wägung.

Probekörper ZB03 (Korkschrot Feuchtegehalt 5 M-%)

Bild 2.3.2.2-3 zeigt die Profilmessungen für das mit 5 M-% befeuchtete Korkschrot. Hier liegen zwei Messreihen bei konstantem Feuchtegehalt vor (blau und rot). Der angezeigte Feuchteindex liegt deutlich unter den Werten von Probekörper ZB01 und ZB02. Nach 10 Monaten (lila) ist der Feuchteindex angestiegen und liegt nun etwas unter den gleichzeitig in den anderen beiden Probekörpern gemessenen Werten. Die Massebestimmung ergibt eine zwischenzeitliche Feuchteabgabe von 28 Gramm und damit eine Senkung des Feuchtegehaltes von 5,0 M-% auf 4,2 M-%. Der

angestiegene Feuchteindex deutet richtig auf die Abtrocknung hin. Da aber auch bei den Probekörpern ZB01 und ZB02 ein derartiger Anstieg zu verzeichnen war, bleiben Zweifel über den kausalen Zusammenhang zwischen Materialfeuchte und Messwert.

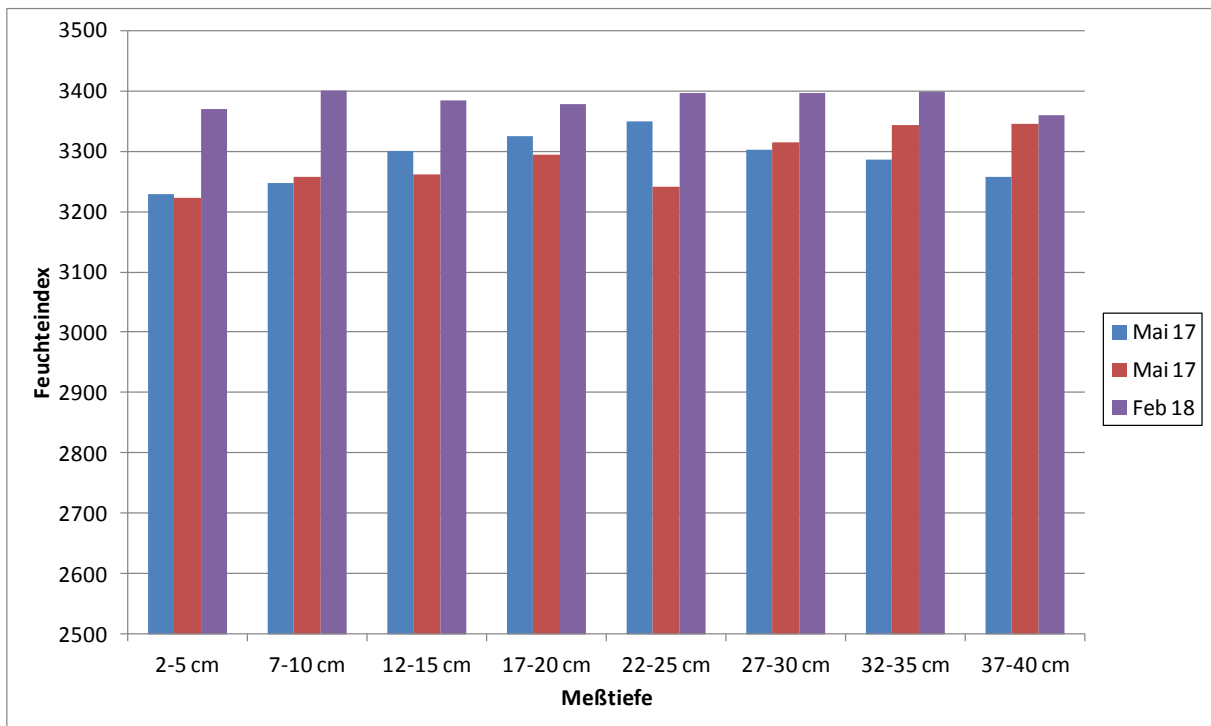


Bild 2.3.2.2-3: Profilmessung Probekörper ZB03 (Korrschrot Feuchtegehalt 5 M-%)

Probekörper ZB04 (Korrschrot Feuchtegehalt 30 M-%)

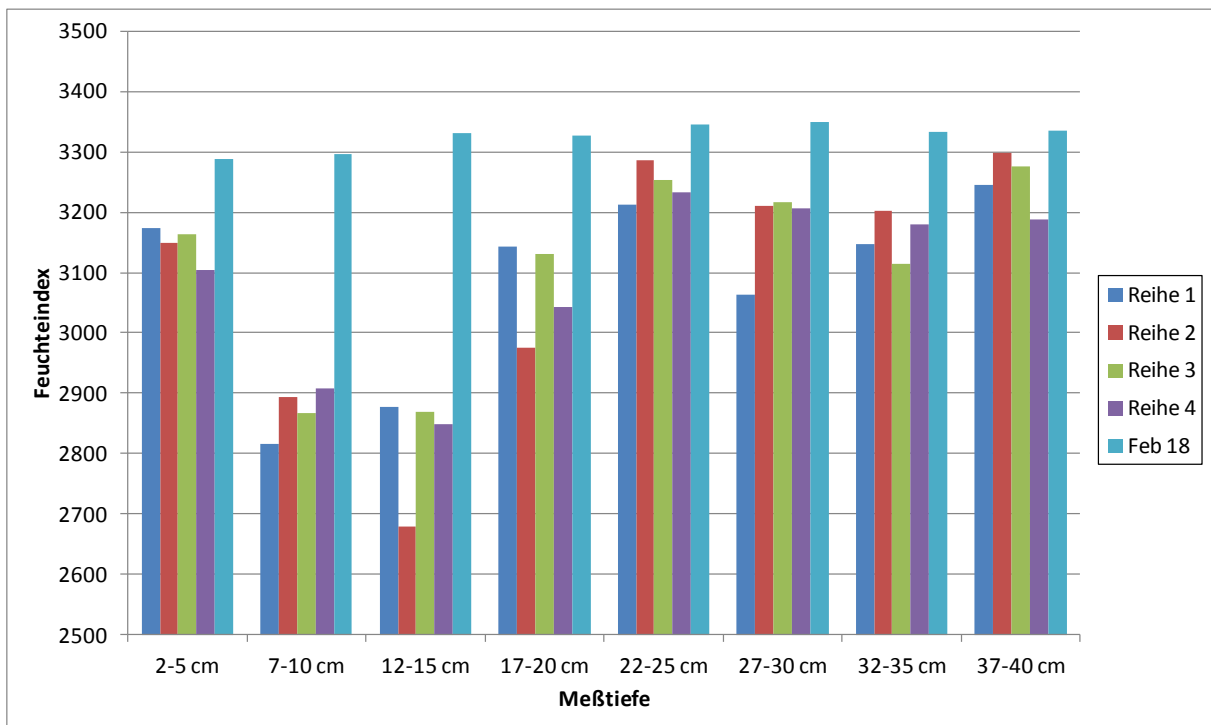


Bild 2.3.2.2-4: Profilmessung Probekörper ZB04 (Korrschrot Feuchtegehalt 30 M-%)

Bild 2.3.2.2-4 zeigt die Profilmessungen für das mit 30 M-% befeuchtete Korkschrot. Die ersten vier Balkenreihen beziehen sich wieder auf den Zustand bei konstanter Gesamtmasse des Probekörpers. Es liegt eine sehr offenbar eine starke Inhomogenität der Feuchteverteilung vor. Eine sichtbare Kondenswasserabscheidung am vorderen Probekörperdeckel lässt erkennen, dass nicht die ganze eingebrachte Wassermenge am Material angelagert ist. Der Zustand ist daher nicht definierbar. Nach 10 Monaten ist der angezeigte Feuchteindex weitgehend gleichmäßig und liegt deutlich höher. In der Zwischenzeit ist die Probekörpermasse um 42 Gramm abgesunken, womit der Feuchtegehalt von 30,0 M-% auf 28,9 M-% gefallen ist.

Probekörper ZB06 (Blähton Feuchtegehalt 8,9 M-%)

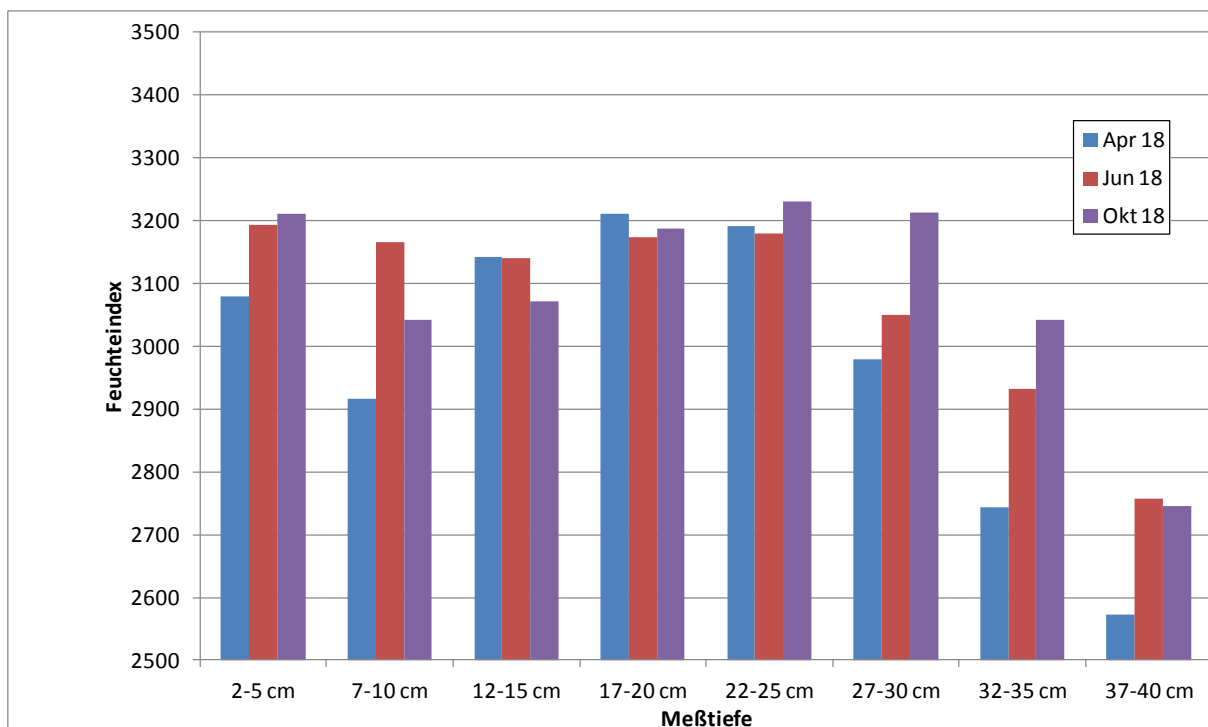


Bild 2.3.2.2-5: Entwicklung des der mit MOIST Endo ermittelten Feuchteprofils im Probekörper ZB06 (Blähton Feuchtegehalt 8,9 M-%)

In Bild 2.3.2.2-5 ist die zeitliche Entwicklung der Messwerte für den auf 8,9 M-% konditionierten Probekörper dargestellt. Aus den Messungen ist eine ungleichmäßige Feuchteverteilung im Ausgangszustand abzulesen, die sich langsam über die Probekörperlänge ausgleicht, wobei dieser Prozess noch nicht abgeschlossen ist. Der Mittelwert der Messpunkte steigt mit der Zeit an, was an sich schlüssig ist und auf eine geringfügige Abtrocknung über Leckstellen hinweist.

Schlussfolgerungen

Bild 2.3.2.2-6 stellt die gemessenen Feuchteprofile der vier mit Korkschatr befüllten Probekörper zum gleichen Zeitpunkt dar. Hieraus ist erkennbar, dass die vom Sensor angezeigten Feuchteindexwerte sehr nah beieinander liegen. Tendenziell scheint eine Vergrößerung der Materialfeuchte eine Verkleinerung des Feuchteindexwertes zu bewirken, was bei der Erstellung einer Kalibrierfunktion zu berücksichtigen wäre. Eine wirklich deutliche Änderung ist bei Übergang auf hohe Feuchtwerte (30 M-%) zu erkennen. Leider ist in diesem Zustand die Feuchteverteilung im Probekörper noch stark inhomogen und teilweise befindet sich die eingebrachte Feuchte nicht im Material selbst, sondern als Kondenswasser an der Behälterwandung. Der Probekörper ZB04 ist daher für die Verwendung zur Kalibrierung des Sensors zu verwerfen. Die Spreizung der Feuchteindexwerte der drei anderen Probekörper ist kleiner als 100 Anzeigeeinheiten anzunehmen und liegt im Bereich äußerer Fehlereinflüsse wie Lageänderung des Sensors im Führungsrohr, Materialeinflüsse aus dem Führungsrohr selbst und aus der Behälterwandung u.ä..

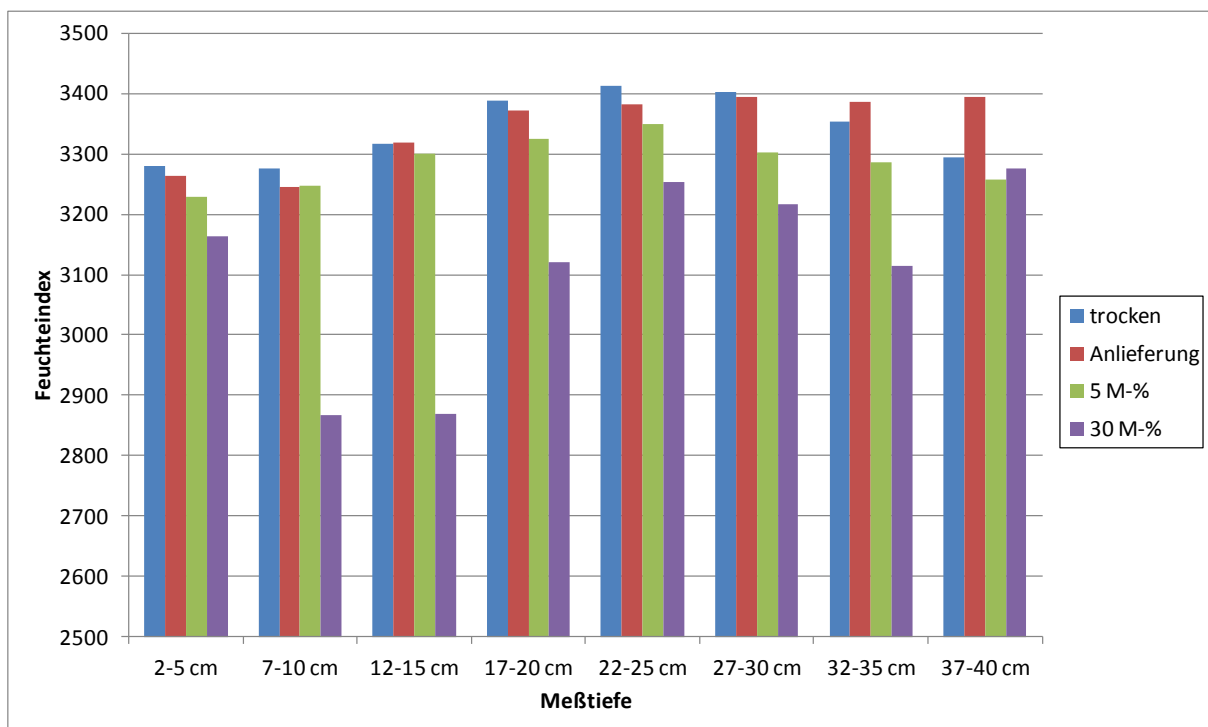


Bild 2.3.2.2-6: Gegenüberstellung der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Kork für einen ausgewählten Zeitpunkt

Bild 2.3.2.2-7 und 2.3.2.2-8 zeigen die mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Feuchteindexeinheiten in den beiden mit Blähton befüllten Probekörpern. Wie bei den Korkmessungen zeigt sich, dass der Feuchteindex mit größerer Feuchte einen kleineren Wert annimmt. Das Feuchteprofil im Anlieferungszustand im Juni 2018 ist nicht plausibel. Zu erwarten wäre eine weitgehende Gleichverteilung der Feuchte, wie in Bild 2.3.2.2-8 dargestellt. Die Ursache liegt vermutlich in einer Veränderung der Sondenlage im Führungsrohr. Diese wird hervorgerufen durch örtliche

Einengungen infolge eingedrungener Blähtonpartikel, die bei jeder Messung durch die Sonde weiter nach hinten geschoben werden.

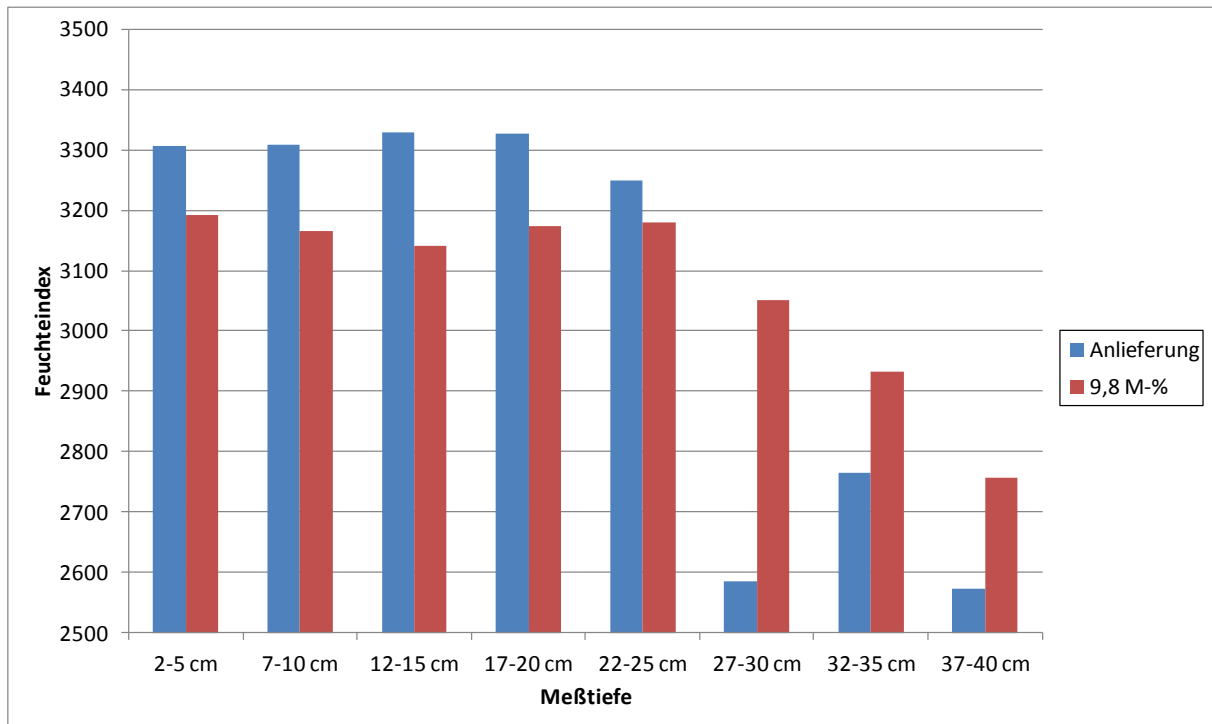


Bild 2.3.2.2-7: Gegenüberstellung der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Juni 2018

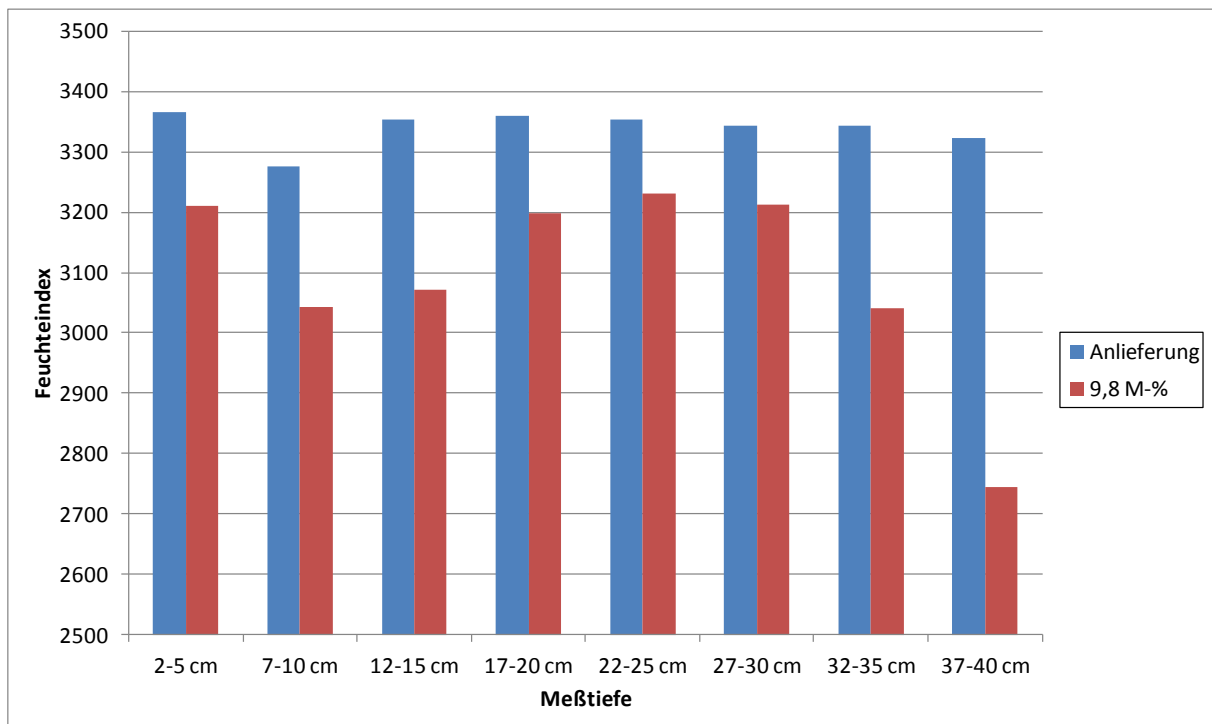


Bild 2.3.2.2-8:Gegenüberstellung der der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Oktober 2018

2.3.2.3 Kalibrierfunktionen

Für die Erstellung der Kalibrierfunktion wird die von der Firma Hf-Sensor GmbH gelieferte Software MoistSetupMaster verwendet. Das Gerät wird mit einer begrenzten Anzahl von Kalibrierfunktionen geliefert. Nicht vorhandene Materialfunktionen müssen durch Anpassung der vorhandenen Kurven vom Nutzer erstellt werden. Bild 2.3.2.3-1 zeigt das Benutzerinterface der Software. In Bildmitte befindet sich der Bereich zur Probenmessung und Eintragung der dazugehörigen Referenzwerte. Im unteren Bereich wird die Kalibrierkurve (gelb) angezeigt, deren Form durch Anpassung der Messfrequenz verändert werden kann. Die vom Programm erzeugten Kontrollpunkte werden auf die Kalibrierkurvenansicht Bild 2.3.2.3-2 übertragen. Dort werden die gelben Funktionswerte vom Benutzer manuell durch Änderung an der rechts sichtbaren Wertetabelle an die Kontrollpunkte angepasst. Aus dem Bild ist zu ersehen, dass der für Kork verwendbare (links abgesetzte) Kurvenabschnitt sehr beschränkt ist und einen sehr kleinen Anstieg aufweist, woraus große Messunsicherheiten resultieren.

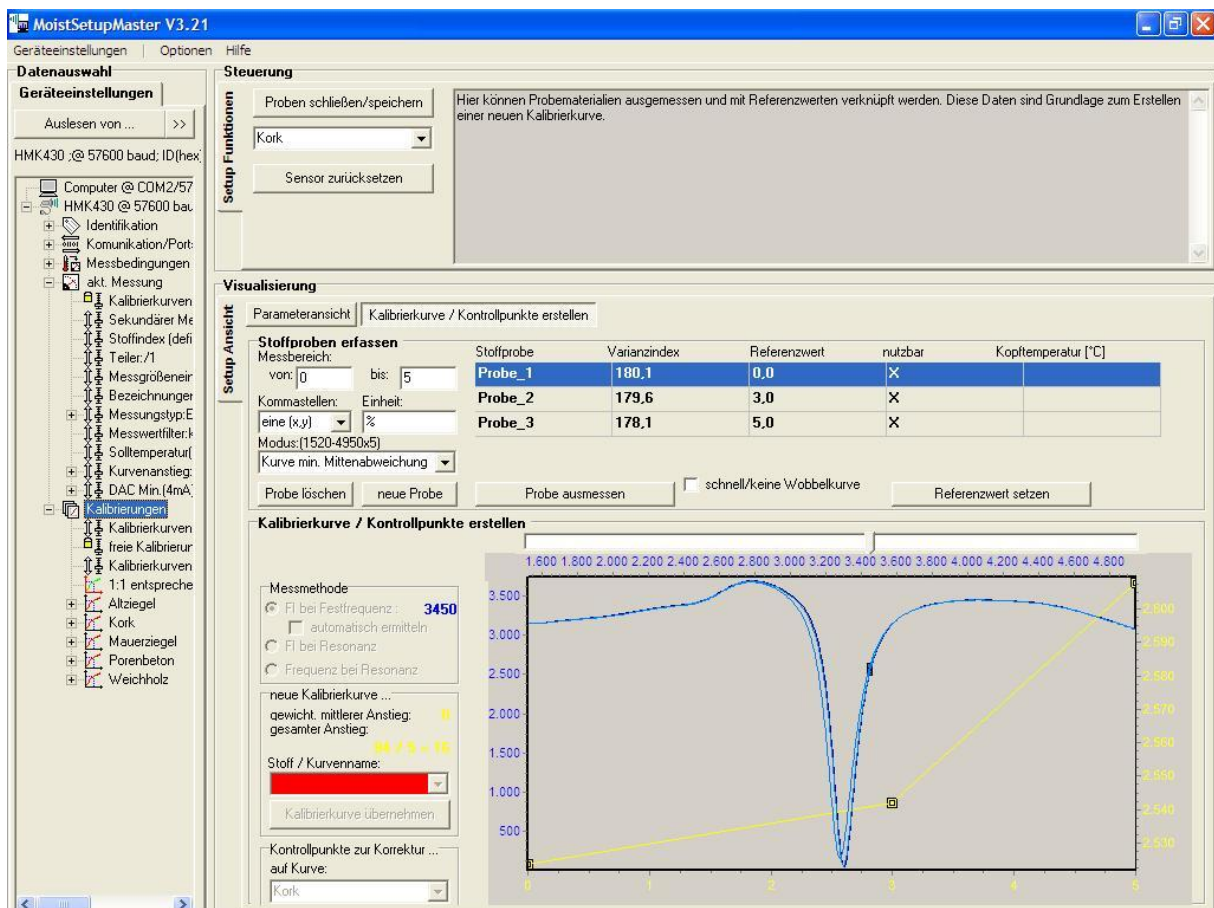


Bild 2.3.2.3-1 MoistSetupMaster – Messung der Proben und Erstellung der Kontrollpunkte

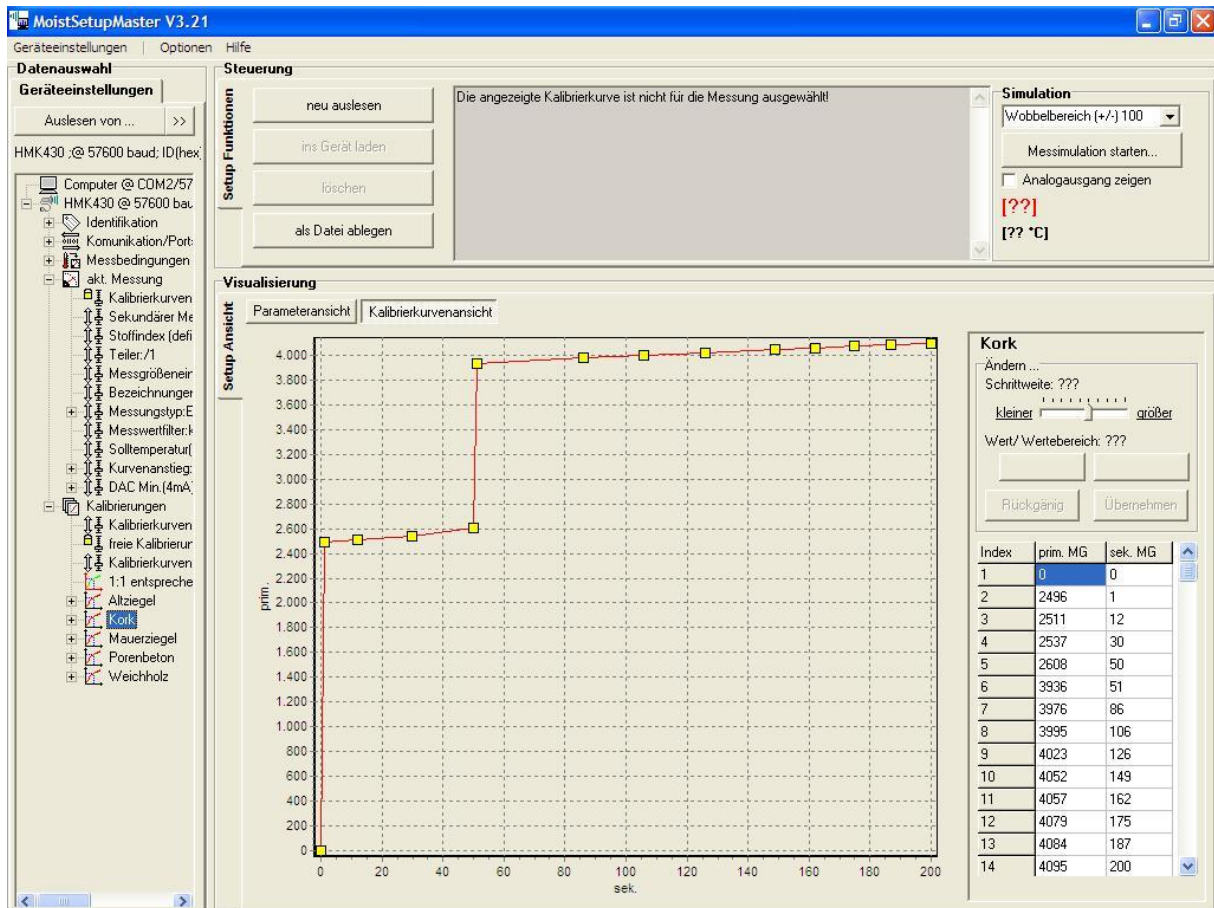


Bild 2.3.2.3-2 MoistSetupMaster – Kalibrierkurvenansicht

Bei Messungen mit der kalibrierten Sonde schwankt die Anzeige bei Wiederholungsmessungen zwischen Maximal- und Minimalwert. Die ungenügende Reproduzierbarkeit der Messwerte bedeutet für dieses Material ein Ausschlusskriterium des beschriebenen Messverfahrens.

3 Einsatz der Feuchtemessverfahren bei der wärmeschutztechnischen Aufwertung von Hohlraummauerwerk

Die Aufgabenstellung des Förderprojektes entstand durch eine Forderung bzw. Fragestellung aus der Baupraxis. Korkschat mit günstigen Produkteigenschaften stand in ausreichenden Mengen gesichert zur Verfügung und sollte Hohlraummauerwerk langfristig wärmeschutztechnisch aufrüsten.

Durch den unvorhersehbaren ungewöhnlich hohen Preisanstieg der Produkte infolge neuer Anwendungsgebiete für durch mehrere Sportarten genutzte Flächen ist die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes entfallen und der KMU-Partner bereitete große Schwierigkeiten. Sie führten zum vorzeitigen Ausstieg des Unternehmens aus dem Projekt und die bereits gesicherten Objekte standen nicht mehr zur Verfügung.

Zu Projektbeginn zeichnete sich mit den angelaufenen Arbeiten ein Problem bei der ordnungsgemäßen Bestimmung von Materialfeuchten ab. Die Arbeiten konnten in Abstimmung mit dem Fördermittelgeber zu einem vorläufigen Abschluss gebracht werden und sollten im Interesse der Bauwirtschaft eine Fortsetzung erfahren (s. Kap. 4).

4 Schlussfolgerungen

Nachwievor zeigen die vorhandenen Materialfeuchtemessverfahren für die Baupraxis entscheidende Nachteile. Das betrifft insbesondere die Reproduzierbarkeit, die örtliche Auflösung und den Zeitgang des Feuchteverlaufs. Die im Kap. 1 ausgewiesenen Darstellungen der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit liefern den deutlichen Hinweis auf eine Alternative. Insbesondere die Wärmeleitfähigkeit vieler Wärmedämmstoffe und damit deren Wärmedämmwirkung besitzt eine stark ausgeprägte Feuchteabhängigkeit. Dieser zweifellos als nachteilig empfundene Zusammenhang lässt sich aber auch nutzen und wird in der Literatur als eine messtechnische Möglichkeit der Feuchtebestimmung seit langem ausgewiesen. Die technologische Umsetzung als industrielles Produkt scheiterte jedoch immer wieder, obwohl gerade dieser Zusammenhang nicht durch vorhandene Salze oder andere Zusatzstoffe in Form beweglicher Ionen – wie bei der elektrischen Leitfähigkeit – verfälscht wird.

Die Abweichungen der praktischen Ausführung eines Gerätes von der theoretischen Voraussetzung des Wärme-Feuchte-Transportes erfordern eine Einmessung für einen vorgegebenen Wärmeleitfähigkeitsbereich von Wärmedämmstoffen und Schüttgütern und eine solche auch für die Materialfeuchte bestimmter Stoffgruppen oder spezifischer Materialien. Hierfür sind Kalibrierkörper erforderlich, die im Falle der Feuchteeinmessung erst geschaffen werden müssen. Für die Einmessung der Wärmeleitfähigkeit stehen Kalibrierkörper renommierter Institute und ein Zweiplattengerät entspr. der EN bzw. ISO Vorgaben zur Verfügung.

Auf dieser Basis ließe sich eine Methode zur Bestimmung hygrothermischer Eigenschaften entwickeln und der Praxis ein Messmittel mit nachfolgenden Eigenschaften in die Hand geben.

- Preiswertes Handmessgerät zur zeit- und ortsabhängigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und Materialfeuchte vorzugsweise für einsteckbare Stoffe und feinkörnige Schüttgüter für wählbar Wärmeleitfähigkeits- Materialfeuchte- und Temperaturbereiche, (mit der Option für nicht einsteckbare Stoffe),
- quasierstörungsfrei arbeitend,
- variabel einsetzbar bzgl. Ortsauflösung und Messdauer
- mit guter Reproduzierbarkeit sowie ausreichender Genauigkeit der Messergebnisse.

Damit würde ein Produkt mit vielseitigen Einsatzmöglichkeiten zur Verfügung stehen, von der Qualitätskontrolle wärmegeämmter Umfassungskonstruktionen im Bauwesen, der Kühlmöbelindustrie, der Verfahrenstechnik einschl. Fernwärmeversorgung über die Produktsteuerung während der Herstellung vorzugsweise von Wärmedämmstoffen bis zur Schadenserkenkung und –ermittlung vor Ort, welches auch gute Exportchancen besäße.

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1-1	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Korkschrot	6
Bild 1.1-2	Wasserdampfsorptionsisotherme für Korkschrot bei 15 °C	7
Bild 1.2-1	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Blähton (Liapor) bei 10 °C	8
Bild 1.2-2	Wasserdampfsorptionsisotherme für Blähton (Liapor) bei 15 °C	8
Bild 1.3-1	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Blähton (Seramis) bei 10 °C	9
Bild 1.3-2	Wasserdampfsorptionsisotherme für Blähton (Seramis) bei 15 °C	9
Bild 2.2.1-1	Materialfeuchtesensor FHA696GF1 der Firma Ahlborn GmbH (ohne Handmessgerät)	12
Bild 2.2.2.2-1	Profilmessung Probekörper ZB03 (Korkschrot Feuchtegehalt 5 M-%)	15
Bild 2.2.2.2-2	Feuchteprofilmessung Ausgangszustand (ohne Nullpunktkorrektur)	16
Bild 2.2.2.2-3	Feuchteprofilmessung vorläufiger Endzustand (ohne Nullpunktkorrektur)	17
Bild 2.2.2.2-4	Gegenüberstellung der mit Ahlborn-Materialfeuchtesensor FHA696GF1 ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Juni 2018	17
Bild 2.2.2.2-5	Gegenüberstellung der mit Ahlborn-Materialfeuchtesensor FHA696GF1 ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Oktober 2018	18
Bild 2.2.2.2-6	Messprofil in 22 cm dickem, homogenen Calciumsilikat- Körper	19
Bild 2.2.2.2-7	Messprofil in 2 x 11 cm dicken Calciumsilikat-Körpern mit zwischenliegendem Luftspalt 2 cm	20
Bild 2.2.2.2-8	Messprofil in 2 x 11 cm dicken Calciumsilikat-Körpern mit zwischenliegendem Luftspalt 5 cm	20
Bild 2.2.2.3-1	Kalibrierfunktion für Ahlborn-Feuchtesonde unter Berücksichtigung aller 4 Probekörper	21
Bild 2.2.2.3-2	Kalibrierfunktion für Ahlborn-Feuchtesonde ohne Berücksichtigung von ZB04	22
Bild 2.3.1-1	Materialfeuchtesensor MOIST ENDO der Firma hf sensor GmbH (ohne Handmessgerät)	23
Bild 2.3.2.2-1	Profilmessung Probekörper ZB02 (Korkschrot trocken)	24
Bild 2.3.2.2-2	Profilmessung Probekörper ZB01 (Korkschrot Ausgleichsfeuchte)	25
Bild 2.3.2.2-3	Profilmessung Probekörper ZB03 (Korkschrot Feuchtegehalt 5 M-%)	26

Bild 2.3.2.2-4	Profilmessung Probekörper ZB04 (Korkschröt Feuchtegehalt 30 M-%)	26
Bild 2.3.2.2-5	Entwicklung des der mit MOIST Endo ermittelten Feuchteprofils im Probekörper ZB06 (Blähton Feuchtegehalt 8,9 M-%)	27
Bild 2.3.2.2-6	Gegenüberstellung der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Kork für einen ausgewählten Zeitpunkt	28
Bild 2.3.2.2-7	Gegenüberstellung der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Juni 2018	29
Bild 2.3.2.2-8	Gegenüberstellung der der mit MOIST Endo ermittelten Profilmesswerte in Blähton für einen ausgewählten Zeitpunkt im Oktober 2018	29
Bild 2.3.2.3-1	MoistSetupMaster – Messung der Proben und Erstellung der Kontrollpunkte	30
Bild 2.3.2.3-2	MoistSetupMaster – Kalibrierkurvenansicht	31

Publikationsliste

Veröffentlichungen zur spezifischen Thematik liegen im Bearbeitungszeitraum nicht vor.

Veranstaltungsliste

Veranstaltungen mit dem Schwerpunkt der Förderthematik sind im Bearbeitungszeitraum nicht durchgeführt worden.