

Schlussbericht vom 30.06.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21322N

Thema

Vergleichmäßigung der Betonqualität durch neue Prüfkonzepte und -methoden für eine zielsichere Bestimmung des Wassergehalts am Frischbeton

Berichtszeitraum

01.09.2020 - 31.12.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. - FTB

Forschungseinrichtung(en)

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

Autoren: Sara Wendel, Felix Hilgert, Robert Adams, Wolfgang Breit

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Inhalt	3
Zusammenfassung	5
Abstract	6
1 Projektbeschreibung	7
1.1 Projekthintergrund	7
1.2 Ziele	7
1.3 Aufbau	8
2 Stand der Technik	10
2.1 Wassergehalt von Frischbeton	10
2.2 Wasserzementwert	10
2.3 Betondruckfestigkeit	11
2.4 Verfahren zur Ermittlung des Wasserzementwerts	13
2.4.1 Direkte Messverfahren	13
2.4.2 Indirekte Messprinzipien	14
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	22
3.1 Arbeitspaket 1 - Festlegung der Betonzusammensetzungen	22
3.1.1 Ziel	22
3.1.2 Ablauf	22
3.1.3 Ergebnisse und Diskussion	23
3.2 Arbeitspakete 2 und 3- Untersuchungsprogramm sowie Analyse, Auswertung und Bewertung der Datenbasis	25
3.2.1 Ziel	25
3.2.2 Ablauf	25
3.2.3 Ergebnisse und Diskussion	27
3.3 Arbeitspaket 4 - Erprobung des Prüfvorgehens unter Praxisbedingungen	45
3.3.1 Ziel	45
3.3.2 Ablauf	45
3.3.3 Ergebnisse und Diskussion	46
3.4 Arbeitspaket 5 – Empfehlung eines Prüf- und Auswertekonzepts; Verfahrensanweisung 50	
3.4.1 Ziel	50
3.4.2 Ablauf	50
3.4.3 Ergebnisse und Diskussion	50

4	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU.....	56
6	Verwendung der Zuwendung.....	57
7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	58
8	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	59
	Literatur.....	63
	Abbildungsverzeichnis.....	67
	Tabellenverzeichnis.....	69
	Anhang.....	70

Zusammenfassung

Durch Feuchteschwankungen der Ausgangsstoffe oder Dosierabweichungen bei der Betonproduktion entspricht der festgelegte Soll-Wassergehalt nicht immer dem tatsächlichen Wassergehalt des Frischbetons. Die Folge ist eine Veränderung des Wasserzementwertes, der ausschlaggebend für die zu erwartenden Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Festbetons ist. Die Risiken eines vom Soll-Wert abweichenden Wasserzementwertes werden in der Praxis üblicherweise durch eine Erhöhung des Zementgehaltes kompensiert. Daraus entstehen einerseits höhere Kosten bei der Herstellung und andererseits ein Mehrbedarf an Rohstoffen.

Die Möglichkeit der exakten Wassergehaltsbestimmung an Frischbeton birgt aus diesem Grund ein enormes Potential zur Einsparung von Kosten und Rohstoffen und zur erweiterten Kontrolle und Optimierung der Frischbetonqualität. Bisher standardmäßig angewandte Prüfverfahren, wie beispielsweise das Darrverfahren, unterliegen verfahrensbedingten Ungenauigkeiten und weisen zudem gewichtige Nachteile auf. Darunter fallen exemplarisch eine lange Versuchsdauer und eine fehlende Wiederholungsmöglichkeit, da das Darren eine zerstörende Prüfung darstellt.

Aus diesem Grund wurde im hier dargestellten Forschungsprojekt die Wassergehaltsbestimmung mittels innovativer Feuchtemesstechnik durch zwei am Markt erhältliche Messsonden untersucht. Beide Messsonden beruhen auf dem Prinzip der indirekten Feuchtemessung. Der Einsatz der modernen Feuchtemesstechnik ermöglicht im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren eine schnellere und zerstörungsfreie Bestimmung des Wassergehaltes. Diverse Faktoren, wie beispielsweise fehlende Erfahrungen zum Einsatz der Messtechnik an Frischbeton, führen bisher jedoch häufig dazu, dass die modernen Feuchtemessverfahren nicht eingesetzt werden. Im Fokus des Forschungsprojektes standen dazu Untersuchungen zur Genauigkeit der neuen Prüfverfahren im Vergleich zu den bisher standardmäßig angewandten Verfahren sowie die Untersuchung wesentlicher beeinflussender Verfahrens- und Materialparameter und die grundsätzliche Eignung für den Praxiseinsatz.

In labortechnischen Versuchsreihen konnten die Zementart, die Zusammensetzung des Zementes, die Sieblinie, das Größtkorn der Gesteinskörnung, der Prüfzeitpunkt und Frischbetoneigenschaften wie die Frischbetonrohichte und –Konsistenz als primäre Einflussfaktoren auf das Messergebnis herausgearbeitet werden. Die darauf abgestimmte Versuchsdurchführung wurde anhand von Praxisuntersuchungen erprobt und entsprechend ergänzend optimiert.

Die Ergebnisse wurden in eine Empfehlung für eine Verfahrensvorschrift für den praktischen Einsatz umgesetzt. Die Verfahrensvorschrift soll Informationen zum Einsatz der Feuchtemesstechnik in Transportbeton- und Fertigteilwerken geben. Da innerhalb des Forschungsprojektes der Einsatz der Feuchtemesstechnik eine gewisse Sensibilität gegenüber den zuvor genannten beton-technologischen Parametern zeigte, empfiehlt sich für eine möglichst hohe Genauigkeit der Wassergehaltsbestimmung bei einer Veränderung der genannten Parameter eine Anpassung der Kalibrierkurve.

Abstract

Due to fluctuations in the moisture content of the raw materials or dosing deviations during concrete production, the specified water content does not always correspond to the actual water content of the fresh concrete. The result is a change in the water-cement ratio, which is decisive for the expected strength and durability properties of the hardened concrete. In practice, the risks of a water-cement ratio deviating from the target value are usually compensated for by increasing the cement content. This results in higher production costs on the one hand and an increased demand for raw materials on the other.

For this reason, the possibility of determining the exact water content of fresh concrete offers enormous potential for saving costs and raw materials and for extended control and optimization of fresh concrete quality. Standard test methods used to date, such as the kiln-drying method, are subject to process-related inaccuracies and have significant disadvantages. These include, for example, a long test duration and a lack of repeatability, as kiln drying is a destructive test.

For this reason, this research project investigated the determination of water content using innovative moisture measurement technology with two measuring probes available on the market. Both measuring probes are based on the principle of indirect moisture measurement. In contrast to conventional methods, the use of modern moisture measurement technology enables the water content to be determined more quickly and non-destructively. However, various factors, such as a lack of experience in the use of measurement technology on fresh concrete, have so far often meant that modern moisture measurement methods have not been used. The research project therefore focused on investigating the accuracy of the new test methods in comparison to the standard methods used to date, as well as investigating the main influencing process and material parameters and their basic suitability for practical use.

In laboratory tests, the type of cement, the composition of the cement, the grading curve, the maximum particle size of the aggregate, the time of testing and fresh concrete properties such as the fresh concrete bulk density and consistency were identified as the primary factors influencing the measurement result. The corresponding test procedure was tested on the basis of practical investigations and optimized accordingly.

The results were translated into a recommendation for a procedure for practical use. The process specification is intended to provide information on the use of moisture measurement technology in ready-mixed concrete and precast concrete plants. As the use of moisture measurement technology within the research project showed a certain sensitivity to the aforementioned parameters, it is recommended that the calibration curve be adapted to ensure the highest possible accuracy in determining the water content when the aforementioned parameters change.

1 Projektbeschreibung

1.1 Projekthintergrund

Der Wasserzementwert gilt als einer der maßgebenden Steuerparameter hinsichtlich der zu erwartenden Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton. Neben den Festbetoneigenschaften nimmt er durch die Beeinflussung der Konsistenz auch Einfluss auf die Frischbetonqualität. Der tatsächlich vorhandene, wirksame Wassergehalt unterliegt aufgrund un stetiger Materialfeuchte und unvermeidbarer Dosierungenauigkeiten im Herstellungsprozess jedoch Schwankungen, wodurch der tatsächliche Anteil meist nicht genau bekannt ist und nicht exakt mit der geplanten Menge übereinstimmt. Zur Kompensation einer verringerten Festigkeit des Betons, die aus einem schwankungsbedingt erhöhten Wassergehalt resultieren kann, wird bei der Herstellung ein Vorhaltemaß in Form einer gesteigerten Zementmenge eingeplant. Eine exakte Steuerung des tatsächlichen Wassergehalts durch Untersuchung einer Frischbetonprobe würde demgegenüber dem erhöhten Rohstoffbedarf entgegenwirken.

Bis heute existiert jedoch kein standardisiertes Prüfverfahren, welches in der Lage ist, unmittelbar und innerhalb kurzer Zeit am Frischbeton den Wassergehalt und damit indirekt den Wasserzementwert (Zementgehalt kann als bekannt vorausgesetzt werden) zu bestimmen und so innerhalb der Produktion direkte Korrekturen zu ermöglichen, bevor der Beton das Transportbetonwerk verlässt. Bestehende Prüfverfahren wie das Darrverfahren oder das Mikrowellenverfahren [DBV-Mbl.] sind subjektiv und zeitintensiv, weshalb sie keine zeitnahen Korrekturmaßnahmen zulassen. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass für die Hersteller von Beton ein Verfahren, mit dem der exakte Wassergehalt des Frischbetons ohne Zeitverlust zur Verfügung steht, einen großen Mehrwert im Hinblick auf die Qualitätssicherung und die Wirtschaftlichkeit darstellt. Dies würde eine zielsicherere Steuerung des Wasserzementwerts auch unter den Randbedingungen der Herstellpraxis ermöglichen.

1.2 Ziele

Ziel des Forschungsprojekts war die Untersuchung neuer Messtechnik zur Bestimmung des Wassergehalts von Frischbeton zur Vergleichmäßigung der Betonqualität. Dazu sollen im Rahmen von Labor- und Praxisversuchen verschiedene am Markt erhältliche Messgeräte für die indirekte Feuchtemessung auf ihre Präzision untersucht werden. Dabei sollen sowohl Einflussfaktoren aus der Versuchsdurchführung als auch der Materialzusammensetzung detektiert werden. Die erzielten Messergebnisse sollen denen der aktuell standardisiert angewendeten Prüfverfahren in puncto Prüfdauer, verfahrensbedingten Schwankungen und Messpräzision gegenübergestellt und bewertet werden. Auf der Grundlage der durchgeführten Laborversuche ist eine Verfahrensanweisung zu erstellen, die unter Praxisbedingungen innerhalb des Forschungsprojekts getestet und optimiert werden soll.

Durch die Untersuchung der Prüfverfahren soll das Innovationspotential, das die indirekte Messtechnik bietet, für die Transportbetonindustrie erschlossen werden. Dieses Potential ergibt sich durch die Möglichkeit der zielgenaueren Einstellung der geforderten Betoneigenschaften und deren Steuerung während der Frischbetonherstellung. Weiterhin soll das Vorhaben zu einer Vergleichmäßigung der Betonqualität bei gleichzeitig ressourceneffizienterem Einsatz der Ausgangsstoffe führen, was eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit mit sich bringt. Die Forschungsergebnisse können bei Transportbetonwerken direkt in den Herstellprozess einfließen und dort

umgesetzt werden. Der potenzielle Nutzerkreis der im Projekt erzielten Forschungsergebnisse umfasst den gesamten Industriezweig der betonherstellenden Industrie, der einen hohen Anteil kleiner und mittlerer Unternehmen aufweist.

1.3 Aufbau

Die Bearbeitung des Projekts erforderte zunächst eine Literaturlauswertung zum Stand der Technik bei der Feuchtemessung an Frischbeton. Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind in Kapitel 2 dargestellt. Die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse der Labor- und Praxisversuche werden in Kapitel 3 vorgestellt. Kapitel 4 enthält eine Zusammenfassung der Abläufe und der wesentlichen Ergebnisse.

Die versuchstechnische Umsetzung des Forschungsprojektes erfolgte in fünf aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen. Diese werden schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt.

Arbeitspaket 1 diente der Festlegung einer Referenzbetonzusammensetzung. Hierzu wurden zunächst auf der Grundlage der Literaturlauswertung zum Stand der Technik bereits bekannte oder untersuchte Einflussfaktoren auf die Feuchtemesstechnik in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Messprinzipien identifiziert. In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PbA) wurde anschließend eine Referenzzusammensetzung für die Festlegung der Verfahrensabläufe und die Durchführung von Screening-Tests festgelegt.

In Arbeitspaket 2 wurden die Ausgangsstoffe charakterisiert und die Laboruntersuchungen zur Ermittlung des Wassergehalts im Frischbeton durchgeführt. Es wurden Kalibrierkurven erstellt und die Feuchtemessverfahren anhand der festgelegten Betonzusammensetzungen erprobt. Ausgehend von der Referenzmischung wurden im Rahmen der Screening-Tests einzelne festgelegte betontechnologische Einflussparameter variiert und deren direkter Einfluss auf die Messergebnisse untersucht.

In Arbeitspakete 3 erfolgte die Auswertung und Analyse der gewonnenen Messdaten. Bei der Bearbeitung der Arbeitspakete 2 und 3 fand stets eine Optimierung des Versuchsprogrammes entsprechend der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse statt.

In Arbeitspaket 4 wurden die gewonnenen Ergebnisse für Untersuchungen im Rahmen von zwei Praxisversuchen unter Praxisbedingungen angewendet.

Auf der Basis der in den Laboruntersuchungen und Praxisversuchen erzielten Ergebnisse, wurde in Arbeitspaket 5 ein Prüf- und Auswertekonzept festgelegt und eine Empfehlung für eine Verfahrensanweisung für die Bestimmung des Wassergehalts erstellt.

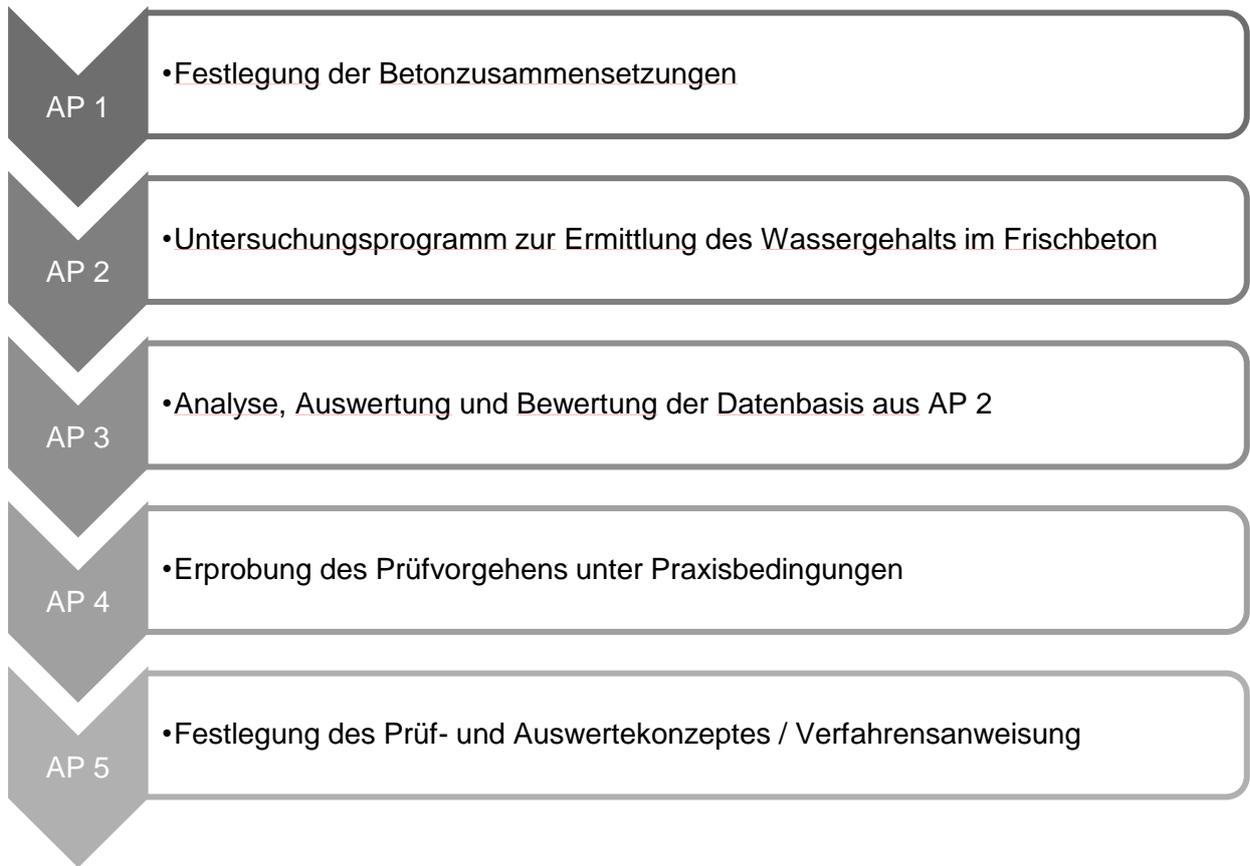


Abbildung 1.1: Projektaufbau

2 Stand der Technik

2.1 Wassergehalt von Frischbeton

Bei der präzisen Bestimmung des Wassergehalts von Frischbeton gilt es zu beachten, aus welchen Komponenten sich der Gesamtwassergehalt der Probe zusammensetzt. Das Wasser kann zum einen über die Feuchte der Gesteinskörnung und zum anderen durch das Zugabewasser im Produktionsprozess in den Frischbeton gelangen. Demnach setzt sich der Gesamtwassergehalt aus der Oberflächenfeuchte und der Kernfeuchte der Gesteinskörnung, dem Zugabewasser und ggf. Anteilen aus flüssigen Betonzusatzmitteln zusammen.

Die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung, die den Gesamtwassergehalt der Gesteinskörnung bezogen auf ihr Trockengewicht beschreibt, setzt sich aus der Oberflächenfeuchte und der Kernfeuchte zusammen. Bei der Oberflächenfeuchte handelt es sich um den Wasseranteil, der sich auf der Oberfläche und zwischen den einzelnen Körnern (Zwickelwasser) befindet und bei der Betonherstellung wie das Zugabewasser zur Reaktion mit dem Zement zur Verfügung steht. Der Gehalt an Oberflächenfeuchte variiert aufgrund von Lagerung und Transport und kann, aufgrund der größeren Oberfläche, bei feineren Korngruppen höhere Werte annehmen. Die Kernfeuchte hingegen beschreibt den durch die Wasseraufnahme ins Innere aufgenommenen Anteil an Wasser und ist stark von der Porosität und der Porenstruktur der Gesteinskörnung abhängig [1]. Der wirksame Wassergehalt, der für die physikalischen und chemischen Erstarrungs- und Erhärtungsvorgänge sowie die Einstellung der Konsistenz erforderlich ist, unterscheidet sich durch den nicht zu berücksichtigenden Anteil der Kernfeuchte der Gesteinskörnung vom beschriebenen Gesamtwassergehalt.

2.2 Wasserzementwert

Der Wasserzementwert gilt als einer der maßgebenden Steuerparameter hinsichtlich der zu erwartenden Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton. Neben den Festbetoneigenschaften nimmt er durch die Beeinflussung der Konsistenz auch Einfluss auf die Frischbetonqualität. Er beschreibt das Verhältnis der Masse des wirksamen Wassers zum Zementgehalt. Seine Relevanz für die wesentlichen baupraktischen Eigenschaften eines Betons, wie beispielsweise die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit, die den Einfluss des Größtkorns und der Korngrößenverteilung auf die resultierenden Festigkeitseigenschaften übersteigt, wurde bereits 1918 von Abrams untersucht und beschrieben [2]. Um den äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ beziehungsweise den Wasser-Bindemittelwert (w/b -Wert) handelt es sich hingegen, sobald neben dem Zement zusätzlich Zusatzstoffe des Typs II (nach DIN EN 206 [3] /DIN 1045-2) verwendet werden, die auf den Zementgehalt angerechnet werden.

Bei gleichbleibender Zusammensetzung beeinflusst die Variation des Wasserzementwerts die Konsistenz des Zementleims bzw. des Frischbetons sowie den sich ausbildenden Porenraum deutlich (Abbildung 2.1) [4; 5]. Die Konsistenz kann demnach durch gezieltes Einstellen des Wasserzementwertes von einer steifplastischen Paste (w/z -Wert 0,20-0,30), über eine Motorenöl-ähnliche Konsistenz (w/z -Wert 0,40) bis hin zu zunehmend weicheren und dünnflüssigeren Konsistenzen variiert und angepasst werden [4].

Die Hydratation des Zements ist ebenfalls direkt an den Wasserzementwert gekoppelt. Zur vollständigen Hydratation des Zements sind etwa 40 % der Masse des Zements an Wasser

notwendig, wobei davon circa 25 % chemisch als Hydratwasser gebunden wird, während der Rest als Gelwasser in den Gelporen - für die Hydratation unzugänglich - physikalisch gebunden wird [4].

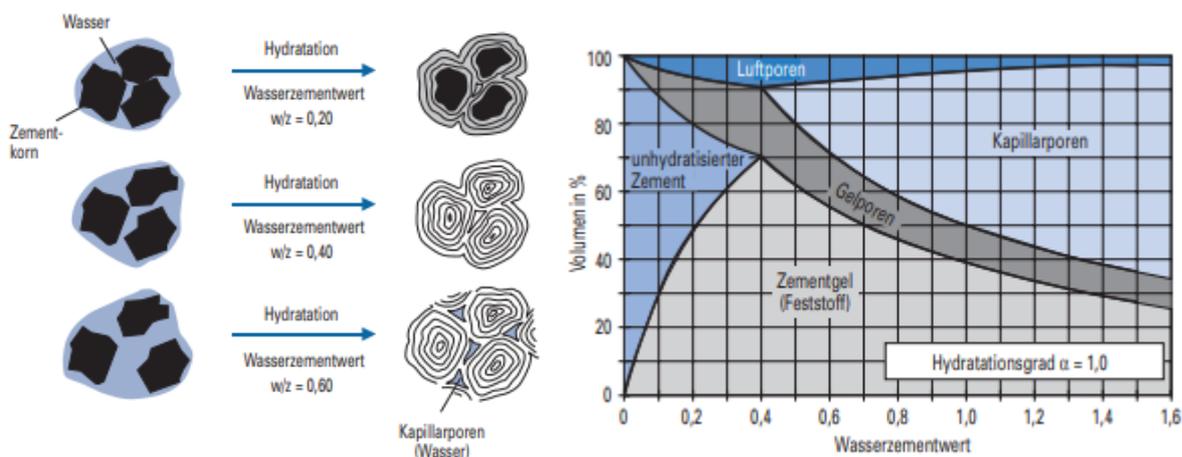


Abbildung 2.1: Einfluss des Wasserzementwertes auf die Hydratation (links) Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (rechts) [4]

Bei den Gelporen handelt es sich um verbleibende Freiräume zwischen den C-S-H-Partikeln [6], die einen Porenradius von $< 0,001 \mu\text{m}$ aufweisen [7]. Unterschreitet eine Zusammensetzung also einen Wasserzementwert von 0,40, steht nicht genügend wirksames Wasser zur vollständigen Hydratation zur Verfügung, wodurch unhydratisierter Zement im Stoffsystem verbleibt. Wird der Wasserzementwert von 0,40 hingegen überschritten, verbleibt nach vollständiger Hydratation mehr Wasser im System, welches als Überschusswasser bezeichnet wird. Dieses Überschusswasser führt zur Bildung von Kapillarporen, deren Porenradius vorwiegend unterhalb von $0,1 \mu\text{m}$ liegt. Sie beeinflussen die Permeabilität des Zementsteins dadurch, dass sie mit den kleineren Gelporen verbunden sind, wodurch sich ein Porensystem im Gefüge ausbildet [7]. Mit zunehmendem Luftgehalt, herbeigeführt durch einen hohen Wasserzementwert, eine unzureichende Verdichtung oder das Einführen künstlich erzeugter Luftporen durch die Zugabe von luftporenbildenden Zusatzmitteln, geht eine Abnahme der Festigkeit einher.

2.3 Betondruckfestigkeit

Die im Mischungsentwurf anzusetzende Druckfestigkeit kann durch die Festlegung des Wasserzementwertes und der Festigkeitsklasse des zu verwendenden Zements anhand der Walz-Diagramme [8] abgeschätzt werden. Die Grundlagen dazu lieferte Abrams bereits 1918, indem er durch das sogenannte Abrams-Law bewies, dass sich die Festigkeit bei gleichem Luftgehalt, vollständiger Verdichtung und gleichem Zementgehalt antiproportional zum Wasserzementwert verhält [2]. Walz hat in den 50er und 70er Jahren die Zusammenhänge weitergehend untersucht und belegt, dass Frisch- und Festbetoneigenschaften maßgebend durch die Normfestigkeit des Zements, die Gesteinskörnung (Sieblinie, Kornform, Größtkorn, Art der Gesteinskörnung), die Frischbetonkonsistenz, die Verdichtung, das Alter und die Nachbehandlung beeinflusst werden [9]. Durch die entwickelten Diagramme [8], die die Festigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert als hyperbolische Kurve angeben, kann die Betondruckfestigkeit nach 28 d abgeschätzt werden.

Die bereits erwähnte Festigkeitsminderung infolge steigendem Luftgehalt stellt jedoch einen der Fälle dar, in denen Anpassungen der Walz-Kurven notwendig sind. Diesen liegt nämlich ein

Luftporengehalt von 1,5 Vol.-% zugrunde, sodass bei darüber liegenden Luftgehalten vorab eine Anrechnung auf den Wasserzementwert erfolgen muss [5].

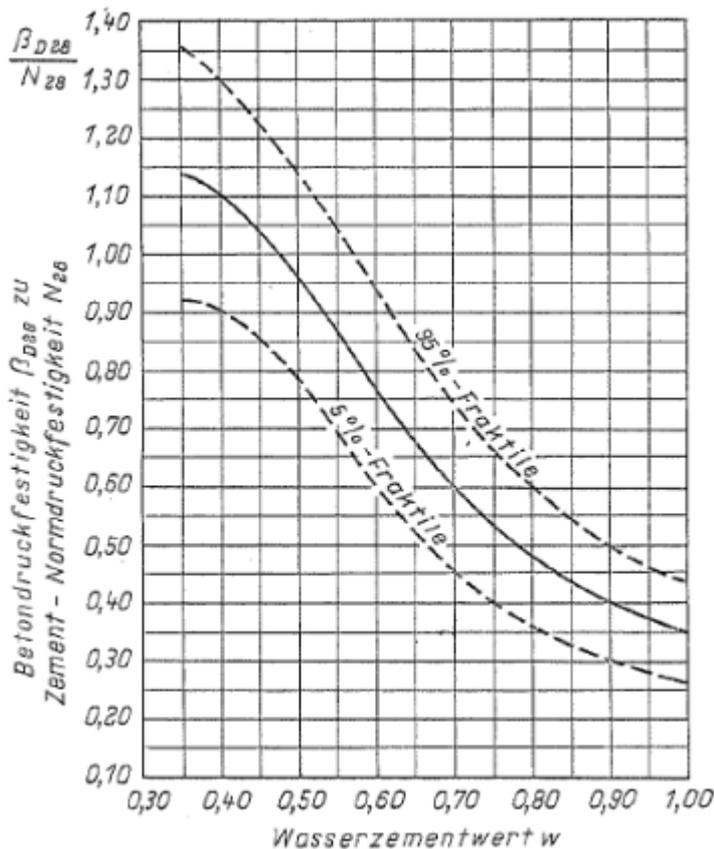


Abbildung 2.2: Betondruckfestigkeit β_{D28} zu Zement-Normdruckfestigkeit N_{28} in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach [8]

Eine zusätzliche Präzisierung der vorhergesagten Betondruckfestigkeit kann laut Hanke und Siebel [10] durch den Einbezug zusätzlicher Kennwerte ermöglicht werden. Dazu zählen der Kornaufbau und die Kornform, die Wasserfilm- und Feinstmörtelschichtdicke, die Granulometrie sowie die Reaktivität des verwendeten Zements. Finden in der Vorhersage der Wasserzementwert, die Zementfestigkeitsklasse, der Wasseranspruch Berücksichtigung, ist eine Abschätzung der Betondruckfestigkeit demnach möglich. Diese präzise Planung steht in der Praxis jedoch der prozessbedingt schwankenden Genauigkeit gegenüber, die zu Abweichungen zwischen der Planung und der tatsächlich eingebauten Frischbetonzusammensetzung führen kann. Feuchteschwankungen der Gesteinskörnung, natürliche Abweichungen in den Eigenschaften der Ausgangsstoffe sowie Dosierungenauigkeiten im Herstellungsprozess können beispielsweise Schwankungen im Wassergehalt von Frischbeton hervorrufen. Der Wasserzementwert (w/z -Wert), welcher im Zusammenhang mit der Normfestigkeit des Zements die Grundlage der zeitabhängigen Festigkeitsprognose darstellt, kann dadurch Abweichungen aufweisen. Um sicherzustellen, dass geforderte Druckfestigkeiten zielsicher erreicht und damit die notwendigen Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften eingehalten werden, werden auf die nominellen Zielfestigkeiten Vorhaltemaße von 6 bis 12 MPa bei der Betonherstellung berücksichtigt.

Eine Überprüfung erfolgt durch die vom Transportbetonhersteller innerhalb der Produktionskontrolle durchzuführenden Konformitätsnachweise nach DIN EN 206-1/DIN1045-2 [9]. Da die Festigkeitseigenschaften erst nach der Erhärtung am Festbeton geprüft werden können, wird im

Frischbeton mit einem Sicherheitspuffer gearbeitet, um die Betonqualität sicherzustellen. Dies ist notwendig, da bisher kein belastbares Prüfverfahren vorliegt, welches den Wassergehalt (und damit bei bekannten Zementgehalt den Wasserzementwert) innerhalb kurzer Zeit am Frischbeton bestimmen kann, wodurch eine Korrektur innerhalb des Produktionsprozesses zur Sicherstellung des Soll-Wertes ermöglicht werden würde. Bestehende Verfahren wie beispielsweise das Frischbetondarren (vgl. Kapitel 2.4.1) sind zeitintensiv und erlauben daher keine rasche Beurteilung des Wassergehaltes. Im Sinne einer nachhaltigen Betonentwicklung mit reduziertem Rohstoffbedarf, die durch die präzise Bestimmung des Wassergehalts unter Annahme eines bekannten Zementgehalts eine Festigkeitsprognose (nach Walz) ermöglicht, wächst die Notwendigkeit nach einem Prüfverfahren, das den Wassergehalt von Frischbeton zielsicher bestimmt.

2.4 Verfahren zur Ermittlung des Wasserzementwerts

Die bereits erläuterte Bedeutung der genauen Kenntnis des Wassergehalts bzw. des Wasserzementwerts einer Betonzusammensetzung bildet die Grundlage für die Vielzahl an Prüfverfahren, die in der Literatur und Regelwerken vorliegen. Bei der Bestimmung des Wassergehalts ist dabei zwischen indirekten und direkten Messverfahren zu unterscheiden.

2.4.1 Direkte Messverfahren

Direkte Verfahren nutzen die stoffliche Separation von Feststoff und Wasser ohne vorherige Kalibrierung, um den Wassergehalt einer Probe bzw. eines Materials quantitativ zu ermitteln. Die Wassermasse kann dabei direkt durch Destillation, Verdampfung oder Einfrieren ermittelt werden, wodurch die Ergebnisse dieser Verfahren oftmals als Referenzwert für indirekte Verfahren herangezogen werden [11]. Die direkten Verfahren liefern demnach einen absoluten Feuchtewert, zählen jedoch zu den nicht zerstörungsfreien Methoden, weshalb Wiederholmessungen nicht möglich sind. Des Weiteren gelten die direkten Prüfverfahren oftmals als zeitaufwändig, fehleranfällig und subjektiv in ihrer Ausführung.

Als Standardprüfverfahren für Frischbeton gelten in Deutschland bislang der Darrversuch sowie das Mikrowellenverfahren, die im DBV-Merkblatt „Frischbetonprüfungen“ [12] geregelt bzw. in der zurückgezogenen Norm DIN 1048-1:1972-01 [13] aufgeführt sind.



Abbildung 2.3: Bestimmung des Wassergehalts einer Frischbeton mittels darrverfahren über einem Gasbrenner

Beim Darrversuch wird die Probe unter ständigem Rühren mittels einer Gasflamme scharf und möglichst rasch bis zur Massekonstanz getrocknet (Abbildung 2.3). Durch Rückwiegen der Probe nach Abkühlung kann der Wassergehalt errechnet werden. Durch dieses Verfahren wird der Gesamtwassergehalt der Frischbetonprobe bestimmt, der sich aus dem freien Wasser der Zusammensetzung, dem Kernwasser der Gesteinskörnung und den Zusatzmitteln, welche sich wie Wasser verhalten, zusammensetzt. Dieser Wassergehalt $m_{b,w}$ kann unter Einbezug der bekannten Massenverhältnisse und der Rohdichte ρ des Frischbetons folgendermaßen berechnet werden:

$$m_{b,w} = \frac{m_{b,h} - m_{b,d}}{m_{b,h}} * \rho \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$m_{b,w}$ Wassergehalt der Probe [kg]
 $m_{b,h}$ Masse feuchte Betonprobe [kg]
 $m_{b,d}$ Masse trockene Betonprobe [kg]
 ρ Rohdichte Frischbeton [kg/m³]

Während die Baustellentauglichkeit oftmals als Vorteil des Verfahrens gewertet wird, werden die benötigte Probenmenge von 5 kg, die Fehleranfälligkeit aufgrund der möglichen Restfeuchte, die subjektive Bestimmung des Trocknungszustands, die Gefahr des Materialverlusts sowie die Prüfdauer (die mindestens 20 Minuten für den Trocknungsvorgang zuzüglich der Abkühlungszeit beträgt) als negative Aspekte der Messmethode gewertet.

Das gleiche gravimetrische Prinzip liegt dem Mikrowellendarren zugrunde. Hierbei wird lediglich die Trocknung nicht durch eine Gasflamme, sondern einen Mikrowellenherd herbeigeführt. Das Prüfverfahren ist in Anlehnung an die inzwischen zurückgezogene ÖNORM B 3326 im DBV Merkblatt Frischbetonprüfungen geregelt. Das Verfahren kann als Alternativverfahren zum Darrversuch herangezogen werden, da ebenfalls der Gesamtwassergehalt der Probe durch Rückwiegen des getrockneten Materials bestimmt wird. Auch wenn in diesem Prüfverfahren die benötigte Probenmenge nur 2 kg beträgt, beläuft sich die Trocknungsdauer in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Wassergehalt und der Mikrowellenleistung auf bis zu 30 Minuten. Weitere direkte Prüfverfahren zur Bestimmung des Wasseranteils stellen die Abflammmethode bzw. das Trocknen mit Spiritus nach ONR 23303 [14] oder die Trocknungsmethode nach NEN 5960 [15], die in den Niederlanden Anwendung findet, dar. Die dargestellten direkten Prüfverfahren haben den Nachteil, dass der geprüfte Beton aufgrund der Dauer der Bestimmung des Wassergehalts in den meisten Fällen bereits eingebaut wird, bis ein Prüfergebnis vorliegt. Durch die Prüfungen aufgedeckte Abweichungen können somit nicht mehr korrigiert werden und ein Eingreifen in den Herstellprozess ist nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wird fortlaufend an Messverfahren geforscht, die durch eine minimierte Zeitverzögerung eine Kontrolle der Frischbetonqualität und die Möglichkeit von Korrekturen zulassen.

2.4.2 Indirekte Messprinzipien

Die indirekten Messverfahren, die in diesem Bericht näher ausgeführt werden, zählen zu den dielektrischen Verfahren [16]. Diese nutzen die Abhängigkeit verschiedener Baustoffeigenschaften von der Feuchte und übertragen die erzielten Messwerte durch eine vorangegangene Kalibrierung auf einen Feuchtegehalt. Zur Detektion von Wasser können je nach Prüfverfahren der Wert der Permittivität (vormals auch komplexe Dielektrizitätskonstante), die Ionenleitfähigkeit oder die Orientierung permanenter elektrischer Dipole von Wassermolekülen im elektromagnetischen Feld als Eigenschaften des Wassers die Grundlage bilden [17]. Erste Ansätze zur Nutzung

von Feuchtesonden wurden bereits in den 80er Jahren entwickelt [18] sowie Messgeräte, die diese Eigenschaften nutzten. Dazu zählt beispielsweise die RAM („Rapid Analyse Machine“), die sich aufgrund des Zeit- und Kostenaufwands jedoch nicht am Markt etablierte [19]. Erste Weiterentwicklungen der Feuchtemesssonden befassten sich primär mit der Feuchtebestimmung von Gesteinskörnung, wohingegen mittlerweile die Wassergehaltsbestimmung an Frischbeton an Bedeutung gewinnt [9].

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts werden Feuchtemesssensoren verwendet, die auf indirekten Messverfahren beruhen. Es handelt sich um dielektrische Prinzipien, die zum einen auf Mikrowellentechnik beruhen und denen zum anderen die Zeitbereichsreflektometrie zugrunde liegt. Dies liegt darin begründet, dass die große Mehrheit der am Markt verfügbaren Feuchtemesssensoren auf den genannten indirekten Prinzipien beruhen und dementsprechend die größte Relevanz für die Praxis besitzen. Gemein haben beide Geräte, dass sie zur Detektion der Feuchte im zu prüfenden Material die dielektrischen Eigenschaften von Wasser nutzen. Diese Kenngröße ermöglicht es, Wasser von anderen Feststoffen abzugrenzen, da die materialspezifische relative Permittivität ϵ_r von Wasser einen Wert von circa 80 einnimmt, während andere Baustoffe und Feststoffe lediglich Werte bis circa sechs erreichen. Die relative Permittivität sagt makroskopisch aus, wie die polaren Moleküle mit der Frequenz eines äußerlich angelegten elektromagnetischen Feldes rotieren [20] und stellt ein Maß für die Durchlässigkeit eines Materials gegenüber einem elektrischen Feld dar [21]. Die frequenzabhängige relative Permittivität ϵ kann als das Produkt der Permittivität des Vakuums ϵ_0 und der materialspezifischen relativen Permittivität ϵ_r angegeben werden.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Die dimensionslose materialspezifische relative Permittivität ϵ_r setzt sich dabei aus den dielektrischen Verlusten ϵ''_r und der komplexen Summe der Polarisationsfähigkeit des Materials ϵ'_r zusammen [22].

$$\epsilon_r = i\epsilon''_r + \epsilon'_r$$

Demnach definiert die relative Permittivität eines Materials theoretisch seine Polarisierbarkeit. Dielektrische Stoffe, deren Ladungsschwerpunkte der Atome und Moleküle aufgrund der unpolaren Bindung zusammenfallen, werden durch Verschiebungspolarisation, also durch elektrische Feldkräfte, polarisiert. In Abhängigkeit von einem Stoff ist bei der Verschiebungspolarisation von dielektrischen Stoffen zwischen Elektronenpolarisation, Ionenpolarisation und Grenzflächenpolarisation zu unterscheiden. Dadurch kann angegeben werden, wie deutlich sich positive und negative Ladungen eines Atoms durch ein elektromagnetisches Feld verschieben lassen. Diese dielektrischen Stoffe weisen eine relative Permittivität von circa 1 auf [23]. Paraelektrische Stoffe hingegen, zu denen Flüssigkeiten als auch Festkörper zählen können, bestehen aus Dipolmolekülen, welche durch Orientierungspolarisation in einem äußeren elektrischen Feld zu den Feldlinien ausgerichtet werden. Ein Unterschied zu den dielektrischen Stoffen ist bei den paraelektrischen Materialien die Temperaturabhängigkeit. Zur Verdeutlichung des Messprinzips kann die relative Permittivität anhand eines Plattenkondensators veranschaulicht werden, der aus zwei gegenüberliegenden Metallplatten besteht. Durch verbinden beider Pole mit einer Gleichspannungsquelle stellt sich dazwischen ein elektrisches Feld E_0 ein, dessen Feldstärke überall gleich groß und gleich verteilt ist [24]. Ein in das Feld eingebrachter Stoff wird polarisiert, wodurch ein elektrisches Feld E_p entsteht, das sich mit dem entgegengesetzt gerichteten Feld des Kondensators überlagert, wodurch sich die Feldstärke E im Kondensator auf den Wert $E = E_0 - E_p$ verringert

[24]. Aus dem Quotienten der Feldstärke in Luft oder Vakuum E_0 und der Feldstärke infolge eines polarisierten Stoffes E errechnet sich die materialspezifische relative Permittivität ϵ_r .

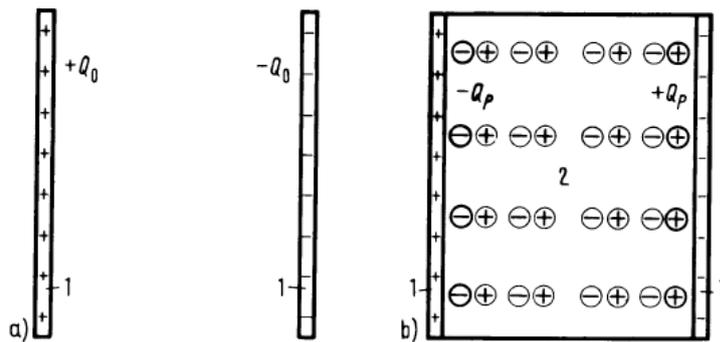


Abbildung 2.4: Geladener Kondensator; a) ohne Dielektrikum; b) mit Dielektrikum [24]

Die Frequenzabhängigkeit, auch Dispersion genannt, ermöglicht eine Trennung der Polarisationsmechanismen, was durch die Untersuchung der relativen Permittivität im statischen elektrischen Feld statt in einem elektrischen Wechselfeld möglich ist. Die Orientierungspolarisation beispielsweise folgt dem elektrischen Feld bei niedrigen Frequenzen ohne nennenswerte Verzögerung, wohingegen bei höheren Frequenzen nur die Elektronen als leichteste Teilchen folgen, wodurch lediglich eine Verschiebungspolarisation stattfindet [25]. Zu einer Phasenverschiebung zwischen der Polarisation der Moleküle und dem elektrischen Feld kommt es dann, wenn die Dipolmoleküle dem äußeren angelegten Feld nicht mehr folgen können, was zu einer Abnahme der Permittivitätszahl führt. Zur Beschreibung des gesamten Frequenzbereichs wurde deshalb die komplexe Permittivitätszahl ϵ_r^* eingeführt, die sich aus dem Realteil ϵ_r' , der als Polarisationsanteil mit dem Feld in Phase ist, und dem Imaginärteil ϵ_r'' , der die elektrischen Verluste beschreibt und die Phasenverschiebung kennzeichnet, zusammensetzt [26].

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$$

Bei der relativen Permittivität handelt es sich um eine frequenzabhängige Größe [27]. Die Orientierungspolarisation nimmt mit steigender Frequenz aufgrund der verlangsamten Drehung der Dipolmoleküle, die auf ihren hohen Massenträgheitsmoment zurückzuführen ist, ab [24]. Lediglich trockene Materialien, die einen Realteil ϵ_r' zwischen drei und sieben und einen Imaginärteil ϵ_r'' von null aufweisen, zeigen keine messbare Abhängigkeit von der Messfrequenz, wohingegen bei Wasser eine hohe Abhängigkeit nachgewiesen wurde [20]. Das Verhältnis von realem und imaginären Anteil der Permittivitätszahl ist abhängig von der verfahrensabhängigen Frequenz und kann demnach variieren. Dieser Zusammenhang ist der folgenden Abbildung 2.5 zu entnehmen.

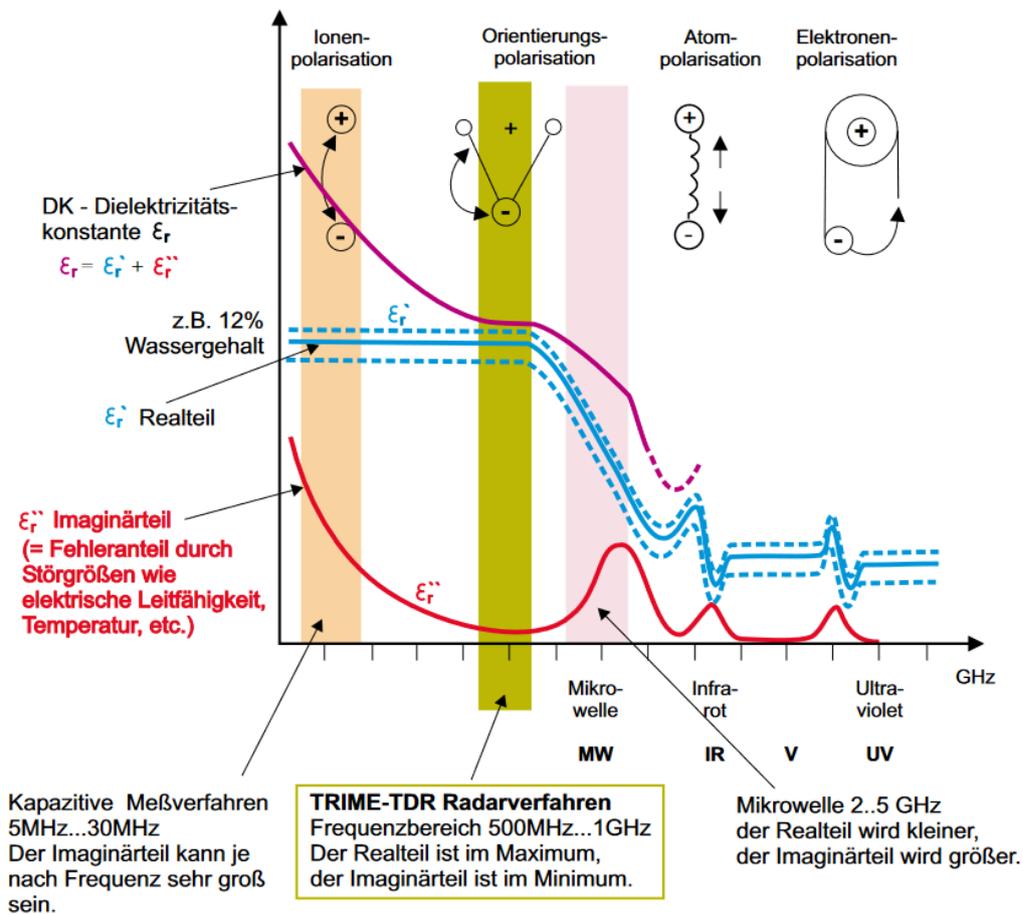


Abbildung 2.5: Verlauf der komplexen relativen Permittivität über einen weiten Frequenzbereich [28]

Des Weiteren verdeutlicht dieses Diagramm, dass beispielsweise Verfahren, welche in einem Frequenzbereich von 0,5 – 1 GHz einzuordnen sind, einen maximalen und konstanten Realteil bei einem Minimum an dielektrischen Verlusten (Imaginärteil) aufweisen, wodurch eine eindeutige Zuordnung des Realteils zum Wassergehalt ermöglicht wird und eine Vernachlässigung der Störeinflüsse des Imaginärteils ermöglicht wird [28].

Eine weitere Abhängigkeit der relativen Permittivität zeigt sich in Bezug auf die elektrische Leitfähigkeit des Materials. Die elektrische Leitfähigkeit selbst wird bei feuchten Baustoffen durch die Temperatur und den Gehalt an gelösten Ionen beeinflusst. Die verlustbehaftete Polarisation führt dazu, dass einer elektromagnetischen Welle beim Durchlaufen eines feuchten und leitfähigen Materials ein Energieverlust widerfährt. Dies führt dazu, dass durch höhere Verluste aufgrund der Leitfähigkeit der Wassergehalt im Material überschätzt wird [29]. Die Beeinflussung durch die elektrische Ionenleitfähigkeit κ_{ion} sowie die Frequenz des elektromagnetischen Signals f können durch den Verlustwinkel ($\tan \delta$) beschrieben werden [20].

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r'}{\epsilon_r''} + \frac{\kappa_{ion}}{\epsilon_0 \epsilon_r 2\pi f}$$

Da die Wärmebewegung von Molekülen einer ausrichtenden Kraft des Feldes entgegenwirkt, hängt die Permittivitätszahl eines Materials, demnach auch die Ausrichtung der molekularen elektrischen Dipole, ebenfalls von der Temperatur des Materials ab [24]. Dies ist insbesondere bei freiem Wasser der Fall (gekennzeichnet in Abbildung 2.5 durch gestrichelte Linie),

wohingegen die dielektrischen Eigenschaften anderer Stoffe (Luft, Baustoffe) eine unwesentliche Beeinflussung durch Temperaturänderungen erfahren [26].

Mikrowellenverfahren

Ein Messprinzip, das bei Feuchtemesssensoren zur Bestimmung der Feuchte von Gesteinskörnungen oder zur Ermittlung des Wassergehalts von Frischbeton zum Einsatz kommt, ist das Mikrowellenverfahren. Es basiert auf den zuvor erläuterten Zusammenhängen zur Permittivität von Wasser.

Dabei durchlaufen elektromagnetische Wellen in Frequenzbereichen von 2.000 – 5.000 MHz eine Probe und erfahren dabei durch die Polarisationsfähigkeit des Materials sowie durch Absorption, Streuung und Reflexion an feuchten Stoffen einen Energieverlust, welcher eine Phasenverschiebung zur Folge hat und messtechnisch zur Feuchtebestimmung herangezogen werden kann [22; 29]. Unterschieden wird in der Mikrowellentechnik zwischen Transmissions-, Reflexions-, Resonatorverfahren und der Zeitbereichsreflektometrie, die schematisch in Abbildung 2.6 dargestellt sind und im Folgenden näher erläutert werden.

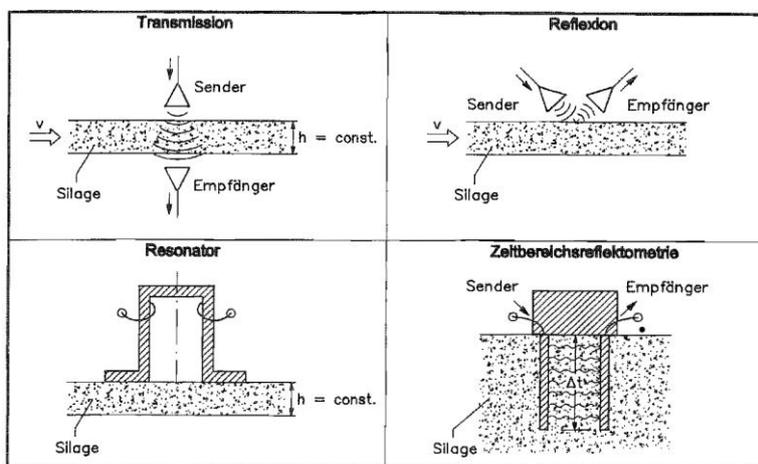


Abbildung 2.6: Unterscheidung verschiedener Feuchtemessverfahren auf Grundlage der Mikrowellentechnik [30]

Reflexionsverfahren

Das Reflexionsverfahren, was im durchgeführten Forschungsprojekt von zentraler Bedeutung ist, stellt ein reflektives Verfahren dar, was bedeutet, dass der Sensor die Wellen sowohl aussendet als auch empfängt. Zur Auswertung werden beide Signale getrennt verarbeitet [31]. Die Umlenkung bzw. Reflexion erfolgt an den Materialgrenzschichten in Abhängigkeit von der Permittivitätszahl des Materials. Aus dem Quotienten der ausgesendeten u_{hin} und empfangenen Welle $u_{\text{rück}}$ errechnet sich der proportional zum Wassergehalt ansteigende Reflexionsfaktor ρ [22].

$$\rho = \frac{u_{\text{rück}}}{u_{\text{hin}}}$$

Im Einsatzbereich von Schüttgütern und Frischbeton ist bei diesem Messprinzip der Einfluss der Korngröße zu erwähnen, der das Messergebnis deutlich beeinflusst. Dies ist auf die aus Inhomogenitäten resultierende periodische Polarisierung zurückzuführen, die in einer Streuwelle resultiert und zu einer Erhöhung der Streuverluste führt [29].

Zeitbereichsreflektometrie

Die Zeitbereichsreflektometrie, die auch als TDR-Verfahren (Time Domain Reflectometry) bekannt ist, stellt das zweite zentrale Messverfahren des Forschungsprojekts dar. Es beruht darauf, dass die Zeit, die ein gesendetes, elektromagnetisches Signal benötigt, um einen vordefinierten Wellenleiter entlang zu laufen, gemessen wird [30]. Die Geschwindigkeit c einer elektromagnetischen Welle, die der Feuchtemessung zugrunde liegt, kann folgendermaßen berechnet werden:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

Dabei entspricht c_0 der Lichtgeschwindigkeit, also einer elektromagnetischen Welle im Vakuum. Außerhalb des Vakuums ist die Geschwindigkeit abhängig von der relativen Permittivität ϵ_r und der magnetischen Permeabilität μ_r , welche außer in Anwesenheit ferromagnetischer Stoffe den Wert 1 annimmt, wodurch die nachfolgende Formel wie folgt angepasst werden kann:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Die elektromagnetische Wellentheorie gibt an, dass eine Änderung der Impedanz zu einer teilweisen bis vollständigen Reflexion einer Welle auf einem Wellenleiter führt [32; 33]. Die Tiefenlage der Impedanz kann demnach bei Verwendung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals durch Messung der Differenz zwischen Aussenden des Signals und Reflexion bestimmt werden. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass bei bekannter Wellenreflexion und Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektromagnetischen Signals die dielektrischen Eigenschaften des zu untersuchenden Materials bestimmt werden können [32; 33].

Die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen erfolgt durch Erzeugung von hochfrequenten elektromagnetischen Impulsen, die von einem Generator erzeugt und entlang eines Koaxialkabels sowie anschließend entlang zweier parallel verlaufender Metall Elektroden definierter Länge ausbreiten. Die Frequenz, die im TDR-Verfahren angewendet wird, liegt meist bei ca. 1 GHz, um sicherzustellen, dass der komplexe Teil der Permittivität vernachlässigbar gering ist [31]. Es entsteht ein elektromagnetisches Feld zwischen den Elektroden und dem Material. Die Laufzeit t der Welle hängt direkt mit dem Wassergehalt des Materials und damit der Permittivitätszahl zusammen, wodurch ein höherer Wasseranteil zu einer längeren Laufzeit führt [20; 34; 35]. Die Laufzeit t ermöglicht durch die Kenntnis der Wellenausbreitungsstrecke l die Bestimmung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit.

$$c = \frac{2l}{t}$$

Hergeleitet aus den vorangegangenen Gleichungen errechnet sich die relative Permittivität wie folgt [36]:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c_0 t}{2l} \right)^2$$

Durch die wechselseitige Beziehung, die zwischen dem volumetrischen Wassergehalt θ_v poröser Medien und der relativen Permittivität besteht, kann auf Basis empirisch und physikalisch basierter Grundlagen durch exakte Bestimmung der relativen Permittivität der volumetrische Wassergehalt eines Materials ermittelt werden [36].

Anhand von Abbildung 2.7 wird die Impulsmessung des TDR-Verfahrens veranschaulichend

dargestellt. Dabei wird das Verhältnis einer ursprünglichen Spannungsamplitude zu seinen reflektierten Anteilen dargestellt, während zu jedem Messsignal ein zugehöriger Spannungswert aufgezeichnet wird, während das Signal zunächst ein Koaxialkabel passiert und daraufhin in die Sondenstäbe übergeht. Dadurch entsteht aufgrund einer Widerstandsänderung eine Spannungsspitze auf die ein, mit dem Wassergehalt korrelierender, Widerstandsabfall folgt. Bei Reflexion des Impulses am Sondenende kommt es erneut zu einem Widerstandsanstieg, wodurch in Summe indirekt die Laufzeit in Nano- oder Pikosekunden ermittelt werden kann [26].

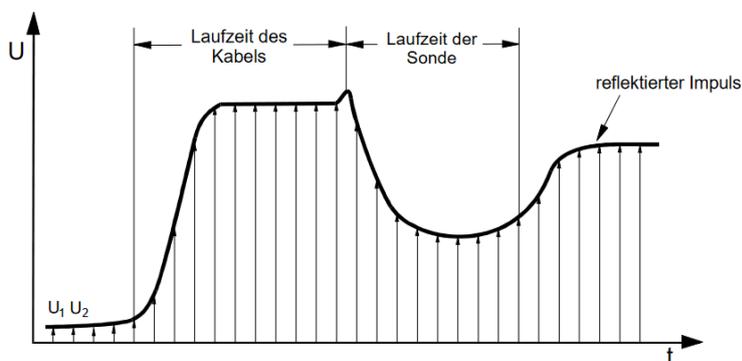


Abbildung 2.7: Impulsmessung nach dem herkömmlichen TDR-Verfahren [35]

Eine Schwachstelle der TDR-Technik liegt in der benötigten Sensitivität der Messtechnik, um belastbare Ergebnisse zu generieren. Dadurch, dass die Zeitdifferenz, die zwischen den Feuchteextremen 0 % und 100 % an einer beispielsweise 15 cm langen Sonde im einstelligen Nanosekundenbereich liegen können, erfordern die Geräte präzise Hochfrequenz-Impulsgeneratoren sowie Oszilloskope [35]. Des Weiteren wird die Detektion von chemisch gebundenem Wasser weiterhin als schwierig eingeschätzt, da eine getrennte Berücksichtigung der vorhandenen Feuchtigkeit (chemisch und physikalisch gebundenes Wasser, hygroskopische Feuchtigkeit) und deren Einfluss auf die Permittivität noch nicht vollends untersucht sind [33].

Als Weiterentwicklung dieser Technik gibt es das TRIME[®]-TDR-Verfahren (Time Domain Reflectometry with Intelligent Micromodule Elements). Im Gegensatz zu den äquidistanten Abständen, in denen das Signal bei der TDR-Technik gemessen wird, wird bei der TRIME-Technik der Zeitpunkt des Eintreffens vordefinierter Spannungsniveaus detektiert. Anstatt eines voltage-samplings findet in diesem Verfahren somit ein time-sampling statt [26]. Dieser Unterschied ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

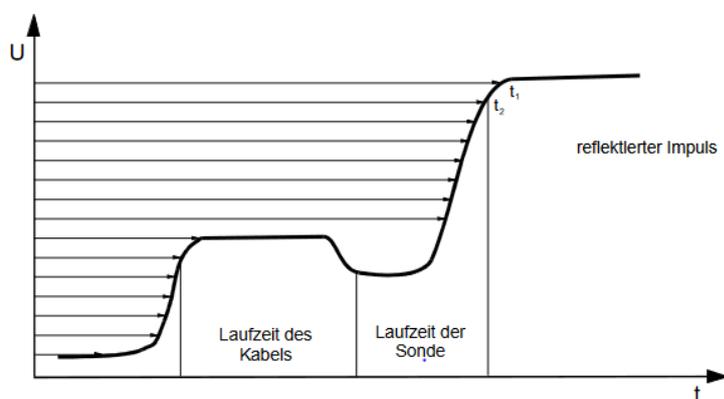


Abbildung 2.8: TDR-Impulsmessung nach dem TRIME-Verfahren [35]

Durch eine Beschichtung der Metallelektroden mit Polyvinylchlorid wird erreicht, dass das Spannungsniveau auch nach der Reflexion nicht abfällt, was für das Messverfahren von Bedeutung ist. Diese Beschichtung wirkt sich auf die gemessene relative Permittivitätszahl aus, wodurch eine Umrechnung des gemessenen Signals notwendig wird. Dies hängt zusätzlich damit zusammen, dass die Laufzeit entlang des Koaxialkabels mitgemessen wird, wodurch eine gemessene Basislaufzeit in die Laufzeit t_p umgerechnet wird, die die Toleranzen der Sondenmechanik einbezieht.

Sowohl für das TDR-Verfahren als auch für die TRIME-TDR-Technik stellt die Leitfähigkeit des zu untersuchenden Materials eine bedeutende Einflussgröße dar. Eine hohe Leitfähigkeit hat einen Spannungsamplitudenverlust zur Folge, die über eine Signalverarbeitung kompensiert werden muss.

Da die Messwerte jedoch nicht ausschließlich durch den Feuchtegehalt des Materials, sondern von weiteren Randparametern wie beispielsweise der Materialzusammensetzung, Temperatur, Dichte und Struktur abhängen [11], ist eine Sicherstellung belastbarer Ergebnisse bei der Messung in abweichenden Frischbetonzusammensetzungen durch die Vielzahl an beeinflussenden Faktoren bislang noch nicht abgeschlossen. Zu unterscheiden ist dabei, aufgrund der Einflussfaktoren und der Wasseraufnahme, zwischen der Feuchtebestimmung von Schüttgütern oder Frischbeton.

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Arbeitspaket 1 - Festlegung der Betonzusammensetzungen

3.1.1 Ziel

Das Ziel des ersten Arbeitspaketes ist die Festlegung der zu untersuchenden Betonzusammensetzungen in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Die Betonzusammensetzungen sollten dabei praxisübliche Betone im normalfesten Bereich darstellen. Zur systematischen Bewertung der untersuchten Feuchtemessverfahren sollten in AP 1 die wesentlichen betontechnologischen Einflussparameter auf die Messergebnisse durch Screening-Tests untersucht werden.

3.1.2 Ablauf

Innerhalb des ersten Arbeitspaketes wurden die Zusammensetzung eines praxisüblichen Referenzbetons sowie die zu verwendenden Ausgangsstoffe festgelegt. Auf Grundlage der Referenzbetonzusammensetzung wurden anschließend die zu variierenden Parameter für Screening-Tests festgelegt und die zugehörigen Zusammensetzungen erstellt. Die Bestimmung der möglichen Variationsparameter wurde dabei mit Hilfe einer Literaturrecherche und Tastversuchen durchgeführt. Im Rahmen der Tastversuche wurde untersucht, welche Bestandteile der Betonzusammensetzung einen Einfluss auf das Messergebnis in Abhängigkeit von dem Messprinzip der Sonden haben können. Als zu variierende Parameter wurden insbesondere der Wasserzementwert, die Konsistenz, Zusatzmittel, Zementart- und Gehalt sowie die verwendete Gesteinskörnung betrachtet. Zudem wurden Betonzusammensetzungen für die Erstellung von 3- und 5-Punkt Kalibrierkurven festgelegt. Da die entwickelte Referenzzusammensetzung während der Feuchtemessungen eine erhöhte Neigung zum Bluten zeigte, wurde eine angepasste Rezeptur entwickelt und eine zweite Screening-Reihe durchgeführt. Die Ergebnisse und Einzelheiten der Untersuchungen des ersten Arbeitspaketes werden in Kapitel 3.1.3 erläutert.

Als Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtegehaltes wurden einerseits das Mikrowellenverfahren und andererseits ein Verfahren auf Grundlage der Zeitbereichsreflektometrie eingesetzt. Zu diesen Verfahren existieren am Markt erhältliche mobile Messsonden, weshalb diese Verfahren eine hohe praktische Relevanz darstellen und den Stand der Technik bei den zur Verfügung stehenden Messsystemen abbilden. Die Messsonde, welche auf der Zeitbereichsreflektometrie (genauer der Trime®-TDR-Technologie) beruht, wird im Folgenden als „Feuchtesonde 1“ bezeichnet, die Messsonde auf Basis der Mikrowellentechnik entsprechend als „Feuchtesonde 2“. Als Referenzverfahren zur Prüfung des Wassergehaltes am Frischbeton wurde das im DBV-Merkblatt „Frischbetonprüfungen“ geregelte Verfahren des Darrens eingesetzt.

Die für die Messungen nach den genannten Verfahren vorgesehenen Frischbetonproben wurden jeweils sofort nach dem Mischen entnommen und anschließend geprüft. Für die Messungen wurden die Sonden jeweils 15 Mal in die mittels Rütteltisch verdichtete Frischbetonprobe eingetaucht. Auf der Grundlage der durchgeführten Messungen konnten Kalibrierkurven erstellt werden, mit deren Hilfe das Rohmessergebnis der Sonden, in einen Wassergehalt überführt werden kann.

Weitere Erläuterungen zum Prüfvorgehen sind Kapitel 3.2.3 zu entnehmen.

3.1.3 Ergebnisse und Diskussion

Die vorgegebenen Randbedingungen zur Festlegung der Zusammensetzung des im Forschungsprojekt anzuwendenden Referenzbetons lauteten wie folgt:

- Dreistoffsystem (Reduktion von Einflussfaktoren)
- CEM II/B-S 42,5 N
- w/z-Wert von 0,60
- Konsistenzklasse F3
- Rundkorn mit einem Größtkorn von 16 mm und einer Sieblinie A/B

Im Vordergrund der Festlegung stand eine Eingrenzung der beeinflussenden Faktoren auf ein Minimum, da auf der Grundlage der durchgeführten Literaturrecherche bereits anzunehmen war, dass die Größenverteilung der Gesteinskörnung, die Zementart sowie die Frischbetondichte einen Einfluss auf die Messtechnik und das erzielte Messergebnis nehmen könnte.

Die zunächst vorgesehene Referenzbetonzusammensetzung neigte bei den praktischen Prüfungen zu deutlichem Bluten (siehe Abbildung 3.1). Dies kann aufgrund der resultierenden Inhomogenität des Materials zu Messungenauigkeiten führen, weshalb die Referenzzusammensetzung stabilisiert und an die Randbedingungen angepasst werden musste.



Abbildung 3.1: Problematik der Zusammensetzung des Referenzbetons 1; direkt nach Mischende (links); nach Messung Feuchtesonde 1 (Mitte) und nach erneuter Verdichtung, vor Messung Feuchtesonde 2 (rechts)

Zur Optimierung der Zusammensetzung des Referenzbetons wurde daraufhin ein Wasserzementwert von 0,55 bei einem Zementgehalt von 320 kg/m³ festgelegt. Durch Messungen von Proben mit einem Wasserzementwert von 0,60 und 0,50 bei gleichbleibendem Zementgehalt von 320 kg/m³ und dadurch variierendem Wassergehalt wurden anschließend Messwerte für die Erstellung von Kalibrierkurven aufgenommen.

Da die Zusammensetzung, die in der ersten Versuchsreihe mit einem Wasserzementwert von 0,60 als Referenz diente, im folgenden Versuchsablauf als oberer Kalibrierpunkt festgelegt wurde, wurde die Konsistenz der weiteren Zusammensetzungen durch die Zugabe von Fließmittel möglichst gleichbleibend auf die Konsistenzklasse F3 eingestellt.

Die Zusammensetzung des oberen Kalibrierpunktes (w/z-Wert 0,60) wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss folgendermaßen festgelegt:

- Zementgehalt CEM II/B-S 42,5 N: 320 kg/m³
- Wassergehalt: 192 kg/m³
- Quarzsand 0/0,25: 45 kg/m³

- Sand 0/2: 665 kg/m³
- Kies 2/8: 378 kg/m³
- Kies 8/16: 676 kg/m³
- Zielkonsistenz: ~ F3

Die angegebene Zusammensetzung erzielte in Laborversuchen eine Konsistenz F3, eine Druckfestigkeit $f_{c,cube} = 40,7 \text{ N/mm}^2$ und einen mittels Darren ermittelten Wassergehalt von 190 kg/m³.

Der Einfluss der zur Konsistenzeinstellung verwendeten Fließmittel auf PCE-Basis auf das Messergebnis der Feuchtesonden wurde in diesem Zusammenhang ebenfalls geprüft und zeigte bei beiden Messprinzipien keinen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis. Es wurden Fließmittelanteile von 0-0,35 M.-% bezogen auf den Zementgehalt untersucht, die nur zu sehr geringen Abweichungen in den aufgenommenen Messwerten führten.

Im Rahmen von Screening-Tests wurde auch der Einfluss der Zementart auf die Messergebnisse untersucht. Hierzu sollten die Untersuchungen zur Minimierung weiterer Einflussfaktoren an Zementleim durchgeführt werden, woraus jedoch zwei Probleme resultierten. Zum einen kam es während des Messvorgangs zu einer Sedimentation des Bindemittels, weshalb keine Messung in homogenem, ruhendem Material möglich war. Außerdem kam es durch die hohe Leitfähigkeit zu extrem hohen Messwerten, sodass keine Messung möglich war oder sich das Messergebnis im Bereich der Messträgheit der Sonden befand, woraus kein verlässliches Ergebnis abzuleiten war. Aus diesem Grund wurde die Zusammensetzung durch die Zugabe von Sand so angepasst, dass eine vergleichende Prüfung der Materialien ermöglicht wurde. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde später an ausgesuchten Frischbetonzusammensetzungen geprüft. Es zeigte sich, dass die Messwerte der Frischbetonproben zwar über den Ergebnissen der Proben mit einem Größtkorn von 2 mm lagen, die sich abzeichnenden Tendenzen jedoch vergleichbar sind.

Auf den Ergebnissen der durchgeführten Versuchsserien aufbauend, wurden fortlaufend die weiteren Betonzusammensetzungen für die Untersuchungen in AP 2 oder die Durchführung von Screening-Tests geplant. Die folgenden Untersuchungen sollten mehrere Einflussfaktoren in unterschiedlicher Kombination beleuchten und dadurch die Bestimmung des Einflusses auf das Messergebnis der Feuchtesonden präzisieren.

Zur Erweiterung der Datenbasis für die AP 2 und 3 wurden weitere Zusammensetzungen erarbeitet, die beispielsweise die Konsistenzbereiche F1-F4 abbildeten und somit 90 % der Gesamtproduktion in Transportbetonwerken abbilden [37]. Zusätzlich wurden Zusatzmittel (Fließmittel, Luftporenbildner) in die Matrix zu untersuchender Betone aufgenommen und - um deren alleinigen Einfluss ausgenommen der Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften einzubeziehen - in der bereits beschriebenen Zementleim-Sand-Mischung untersucht.

Im Versuchsaufbau aus einer Referenzmischung, Screening-Tests und daraus abgeleiteter teilfaktorieller Untersuchung der Wechselwirkungen wurden circa 29 Betonzusammensetzungen in mindestens 250 Prüfungen (Gesteinskörnung, Wasser, Zementleim-Sand-Gemisch)/Betonagen untersucht.

3.2 Arbeitspakete 2 und 3- Untersuchungsprogramm sowie Analyse, Auswertung und Bewertung der Datenbasis

3.2.1 Ziel

Das Ziel des zweiten Arbeitspaketes war das Durchführen systematischer Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Parameter auf die Bestimmung des Wassergehaltes im Frischbeton. Darauf aufbauend erfolgte in Arbeitspaket 3 die Analyse, Auswertung und Bewertung der Daten aus Arbeitspaket 2. Mit Hilfe der Untersuchungen und anschließenden Auswertung sollten die maßgebenden Parameter für eine Feuchtemessung auf Grundlage der verschiedenen Sonden aufgedeckt werden.

3.2.2 Ablauf

Das zweite Arbeitspaket ist auf die Bestimmung des Wassergehalts am Frischbeton fokussiert. Um eine effiziente Versuchsmatrix für das Untersuchungsprogramm zu erstellen, bei der gezielt die Einflussgrößen untersucht werden, die Einwirkungen auf das Messergebnis der Feuchtemesssonde haben, wurden zunächst Screening-Tests durchgeführt. Diese gingen von einer Referenzzusammensetzung aus und ergaben durch Variation eines Parameters die Versuchsmatrix. Durch Analyse der Messergebnisse wurden die Faktoren, die in den Screening-Tests eine Beeinflussung des Rohmessergebnisses der Feuchtesonden bewirkten, herausgearbeitet und näher untersucht.

Zur Erstellung einer angepassten Betonzusammensetzung und zur zielgerichteten Auswertung der Messergebnisse unter Einbezug aller Einflussfaktoren wurde zunächst eine eingehende Charakterisierung der Ausgangsstoffe vorgenommen. Darüber hinaus wurden die Eignung der Sonden zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Gesteinskörnung und der Einfluss verfahrensbedingter Parameter (Temperatur, Wasserbeschaffenheit) näher untersucht sowie eine Verfahrensweise für die Bestimmung des Wassergehaltes des Frischbetons festgelegt.

3.2.2.1 Untersuchung der Ausgangsstoffe

Die Charakterisierung der Gesteinskörnungen umfasste die Bestimmung der Wasseraufnahme und der Rohdichte im Pyknometer-Versuch nach DIN EN 1097-6 [38], die Ermittlung der Kornformkennzahl (SI) nach DIN EN 933-4 [39] und der Plattigkeitskennzahl (FI) nach DIN EN 933-3 [40] sowie die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 [41] bzw. 933-2 [42]. Zusätzlich wurde mittels Trocknungsverfahren sowie Sonden die Eigenfeuchte der jeweiligen Körnung bestimmt.

Neben den Gesteinskörnungen wurden auch die verwendeten Zemente untersucht. Dabei wurden die Mahlfineinheit nach DIN EN 196-6 [43], die Normdruckfestigkeit nach DIN EN 196-1 [44] und der Wasseranspruch nach DIN EN 196-3 [45] des Zements ermittelt beziehungsweise weitere Materialcharakteristika durch die Hersteller zur Verfügung gestellt.

3.2.2.2 Untersuchung Feuchtigkeit Gesteinskörnung

Zur Untersuchung der Eignung der Feuchtesonden für die Bestimmung der Feuchte der Gesteinskörnung wurde natürliche Gesteinskörnung der Korngruppen 0/2, 2/8, 8/16 und Splitt 2/8 und 8/16 zunächst einer Grundcharakterisierung (siehe Kapitel 3.2.2.1) unterzogen. Im folgenden Ablauf der Versuchsreihe wurden die Proben vollständig ofengetrocknet bei (110 ± 5) °C und anschließend durch exakte Wasserzugaben auf vordefinierte Feuchtegehalte eingestellt. An diesen Proben wurden nach Verdichtung mit beiden Feuchtemesssonden jeweils 15 Rohmesswerte

direkt nach Wasserzugabe, nach 15, 30 und 45 Minuten bestimmt. In der Zwischenzeit wurden die Proben jeweils abgedeckt gelagert und vor der erneuten Messung für eine Minute erneut gemischt und verdichtet, um eine möglichst homogene Wasserverteilung in der Probe und ein dichtes Materialgefüge zu erzielen. Durch Rücktrocknung einer Probe des Materials im Anschluss an die Messung nach 45 Minuten erfolgte die Kontrolle der eingestellten Soll-Feuchte.

3.2.2.3 Untersuchung Frischbeton – Vorgehensweise

Die Untersuchung des Wassergehalts im Frischbeton erfolgte mittels der bereits in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Feuchtemesstechnik. Zur Verifizierung der aufgenommenen Daten wurden parallel alternative Methoden, wie das Darrverfahren, zur Ermittlung des Wassergehalts durchgeführt. Ergänzend wurde auch die zeitliche Veränderung des Messwerts über die Verarbeitbarkeitszeit ermittelt und mit den Ergebnissen der Bestimmung des Ausbreitmaßes verglichen.

Begleitend wurden die Frischbetonrohddichte sowie der Luftgehalt nach DIN EN 12350-6 [46] und -7 [47] bestimmt. Zusätzlich erfolgte die Einstufung in eine Konsistenzklasse mittels Bestimmung des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350-5 [48] sowie die Ermittlung der Frischbetontemperatur.

Zur späteren Analyse von Wechselwirkungen bei der Messung wurden zusätzlich weitere Parameter, wie die Temperatur (Ausgangsstoffe, Frischbeton) und die Wasserbeschaffenheit (Leitungswasser, demineralisiertes Wasser) herausgegriffen und auf deren Auswirkungen auf die Messergebnisse untersucht.

Für die Untersuchung des Wassergehaltes des Frischbetons wurde ein vereinheitlichtes Vorgehen herausgearbeitet. Dieses umfasste die reguläre Verwendung ofentrockener Gesteinskörnung, die mit 2/3 des Wassers für 30 Sekunden gemischt wurde, woraufhin - nach weiteren zwei Minuten - die weiteren Bestandteile der Zusammensetzung zugegeben und für weitere zwei Minuten gemischt wurden. Direkt nach Mischende wurde die Probe aus dem Mischer entnommen und die Konsistenz bestimmt. Eine Probe wurde in einen handelsüblichen Kunststoffeimer mit circa 12 Litern Fassungsvermögen gefüllt und auf dem Rütteltisch für 30 Sekunden bei circa 3.000 U/Min. verdichtet. Die Probe wurde dann zunächst mit Sonde 2 und im direkten Anschluss (circa 5 Minuten nach Beginn der ersten Messung) nach kurzem erneuten Verdichten (10 Sekunden) mit Sonde 1 geprüft. Die Prüfungen der Feuchtesonden erfolgte nach Herstelleranweisungen, wobei anstatt eines direkten Wassergehalts ein unverarbeiteter Rohmesswert aufgezeichnet wurde und 15 Einzelmessungen anstelle von sechs Einzelmessungen durchgeführt wurden. Je nach Prüfserie wurden parallel der Wassergehalt nach dem Darrverfahren bestimmt und Würfel zur Ermittlung der Druckfestigkeit am Festbeton nach DIN EN 12390-3 [49] entsprechend DIN EN 12390-2 [50] hergestellt und gelagert.

3.2.2.4 Analyse, Auswertung und Bewertung

Die innerhalb der Versuchsserien erzielten Messdaten wurden fortlaufend dokumentiert, analysiert und für die Optimierung der aufbauenden Prüfserien herangezogen. Die 15 Einzelmessergebnisse je Probe und Gerät wurden statistischen Ausreißertests nach Grubbs unterzogen, um verfahrensbedingte Messfehler aus der Auswertung ausschließen zu können. Des Weiteren wurden die Daten auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) untersucht. Aus den Daten konnten dann der Medianwert einer Probe, die Standardabweichung der Einzelmessergebnisse und zur Vergleichbarkeit der Variationskoeffizient ermittelt werden.

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

3.2.3.1 Verfahrensabläufe und Prüfzeitpunkt

Der Verfahrensablauf, der für alle Untersuchungen möglichst analog durchgeführt werden sollte, war überwiegend an die Herstellerempfehlungen der Messgeräte angepasst. Einige Angaben wurden überprüfend in Versuchsreihen aufgegriffen, um eine mögliche Steigerung der Genauigkeit zu überprüfen.

Als Messgefäß wurde, wie empfohlen, ein handelsüblicher 12-L-Kunststoffeimer verwendet, so dass kein Metall im Messbereich war. Nach Einfüllen der Probe sehen die Verfahrensbeschreibungen der Hersteller keine Verdichtung der Probe mithilfe eines Rütteltischs vor. Bei Verwendung von Feuchtesonde 2 wird ein festes Aufsetzen des Eimers auf den Boden vor Einstechen der Sonde empfohlen und nach Eintauchen von Sonde 2 soll durch Klopfen oder leichtes Treten am Eimerrand eine Verdichtung der Probe auf der Sondenoberfläche erfolgen. Dies ist gegebenenfalls auch darauf zurückzuführen, dass eine äußerlich induzierte Verdichtung (rütteln) nicht in allen Praxisanwendungen möglich wäre. Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden trotzdem Messungen ohne und mit Verdichtung mittels Rütteltisch gegenübergestellt, da ein Schließen der Oberflächen und ein vollständiges Verdichten des Materials ab einer Konsistenz von F2 kaum mit den Herstellerangaben zu realisieren war. Durch die erweiterte Verdichtung sollten, in Proben steiferer Konsistenz, Lufteinschlüsse um die Sensoroberfläche und ungleichmäßige Material- und Dichteverteilungen innerhalb des Kunststoffeimers reduziert werden.

Die Messungen ergaben, dass durch eine Verdichtung die Standardabweichung innerhalb einer Messung zwar nur geringfügig herabgesetzt wurde, die Messwerte an sich jedoch bei der Erstellung von Kalibrierkurven zu stetigeren Verläufen und weniger Schwankungen führte. Aus diesem Grund wurde für die Laborversuchsserien eine standardisierte Verdichtung der Probe von 30 Sekunden bei circa 3.000 U/min vorgesehen.

Die Anzahl an Einzelprüfungen, die zu einem Messergebnis verrechnet wird, liegt laut Herstellerangaben bei fünf bis sechs Messungen. Innerhalb der Prüfserien wurden jeweils 15 Einzelmessungen durchgeführt, um durch statistische Auswertung Ausreißer aussortieren zu können, den Verlauf mit zunehmender Messanzahl zu dokumentieren und eine mögliche Erhöhung der Messgenauigkeit zu prüfen. Bei der Auswertung wurden zu diesem Zweck alternativ jeweils die ersten 5, 10 oder alle 15 Messwerte ausgewertet. Die dazugehörigen Ergebnisse, die in Anhang 1 und Anhang 2 dargestellt sind, zeigen die Messdaten der Wiederholmessungen errechnet aus den jeweils fünf, zehn oder mindestens 15 Einzelmessungen. Die Ergebnisse zeigen, dass in den zehn Untersuchungen keine klare Verbesserung durch eine Erhöhung oder Erniedrigung der Anzahl an Messwerten bewirkt wird. Beispielsweise der Variationskoeffizient nimmt im Mittel mit zunehmender Messwertanzahl zu, Einzelmessreihen (bspw. Referenz 1, 3, 10 in Abhängigkeit vom jeweiligen Messgerät) profitieren jedoch von einer höheren Datenanzahl. Diese Feststellung ist auf die Daten der weiteren Versuchsserien zu übertragen. Um eine optimierte Vorgehensweise abzuleiten, wäre eine Reduktion der Messungen auf zehn Einzelmessungen (verkürzte Prüfzeit) optional oder eine Durchführung von 15 Messungen bei einem Einbezug einer reduzierten Datenanzahl (sechs bis zehn Messwerte) in die Auswertung. Dadurch würden die Messergebnisse im Falle einer hohen Standardabweichung und Schwankung der Werte zur Verfügung stehen, um zu prüfen, ob eine Erhöhung der Datenanzahl zu einer Minimierung der Schwankung und Präzision der Ergebnisse führt. Die Anzahl einbezogener Messwerte sollte jedoch pro Prüfreihe identisch sein. Dies bedeutet nicht, dass die Auswahl der Daten dann willkürlich erfolgen könne, es sind in diesen Fällen jeweils beispielsweise die ersten 5, 10 oder 15 Daten in die Berechnung

einzu beziehen. Durch das Herausstreichen von Daten durch Ausreißer (festgestellt durch statistische Verfahren), könnten die weiteren Daten eingebunden werden.

Der Messzeitpunkt ist bei der Messung des Wassergehalts von Frischbeton in Abgrenzung zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Gesteinskörnung zu betrachten, da dabei abweichende physikalische und chemische Prozessabläufe zu anderen Auswirkungen auf das Messergebnis führen.

Durch Anpassung des Prüfverfahrens, Abdeckung der Proben und kurzes erneutes Mischen vor Prüfbeginn war anhand der Messergebnisse festzustellen, dass der Rohmesswert von Frischbetonproben mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum ersten Mischen ansteigt. Dies ist exemplarisch in Abbildung 3.2 für drei verschiedene Frischbetonproben verschiedener Zusammensetzung für Feuchtesonde 1 angegeben. Der Median des Rohmesswerts wurde zum einen direkt nach dem ersten Mischen geprüft. Die restliche Probe verblieb entweder im Mischer und wurde abgedeckt, bis sie nach 45 Minuten erneut für eine Minute gemischt, in den vorgesehenen Eimer gefüllt, verdichtet und geprüft wurde. In den angegebenen Fällen sowie in weiteren Prüfungen zeigte sich ein Ansteigen des Messwertes mit zunehmender Zeit.

Diese Beobachtung ist auch in den später erläuterten Praxisversuchen von Bedeutung. Für eine materialspezifische Kalibrierung ist demnach der Prüfzeitpunkt bestmöglich an die später in der Praxis zu erwartenden Abläufe anzupassen, um ein möglichst übertragbares Ergebnis zu erzielen. Die ursprüngliche Annahme, dass mit zeitlichem Versatz eine Abnahme des Rohmesswertes erfolgt (aufgrund von Wasseraufnahme der Gesteinskörnung, chemischer Bindung von Wasser), wurde durch die Messergebnisse widerlegt. Dieser Effekt zeigt sich in den Ergebnissen beider Geräte und ist deshalb in diesen Prüfreihe n auf beide Messprinzipien zu übertragen.

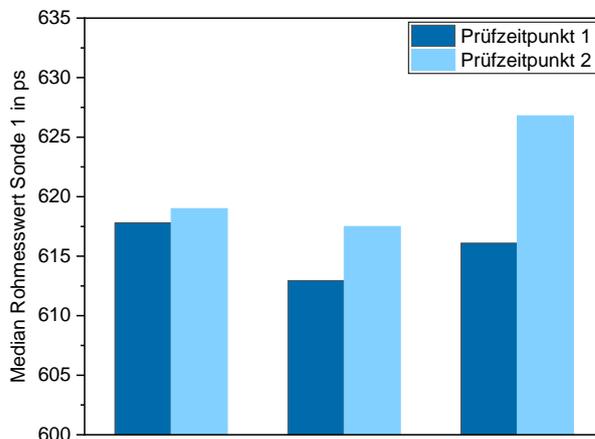


Abbildung 3.2: Darstellung des Einflusses des Prüfzeitpunkts auf das Medianmessergebnis von Feuchtesonde 1

Der zeitliche Einfluss auf das Messergebnis von Frischbetonproben ist vermutlich auf die Zementhydratation zurückzuführen. Die Verwendung von Verzögerer, welcher durch Behinderung des Kristallwachstums eine Verzögerung des Erstarrens bewirkt, hebt die Tendenz der steigenden Messwerte mit zunehmender Zeit auf.

3.2.3.2 Erstellung von Kalibrierkurven

Für die Erstellung von Kalibrierkurven wurden ausgehend von der festgelegten Zusammensetzung des Referenzbetons zwei weitere Betone hergestellt, an denen mithilfe der beiden Sonden jeweils drei Kalibrierpunkte ermittelt wurden (Abbildung 3.3).

Die in Abbildung 3.3 abgebildeten Kalibrierpunkte repräsentieren jeweils den Mittelwert von vier bis sieben Medianwerten, welche wiederum auf 15 Einzelmesswerten beruhen. Die Funktion der Feuchtesonde 1 zeigt innerhalb des geprüften Bereiches der Wasserzementwerte von 0,50 bis 0,60 (bzw. einem Wassergehalt von 160,0 kg/m³ bis 192,0 kg/m³) einen nahezu linearen Verlauf. Die Rohmesswerte der Feuchtesonde 2 führen hingegen ab einem Wasserzementwert von 0,55 (entsprechend einem Wassergehalt von 176 kg/m³) zu einer Abnahme der Steigung.

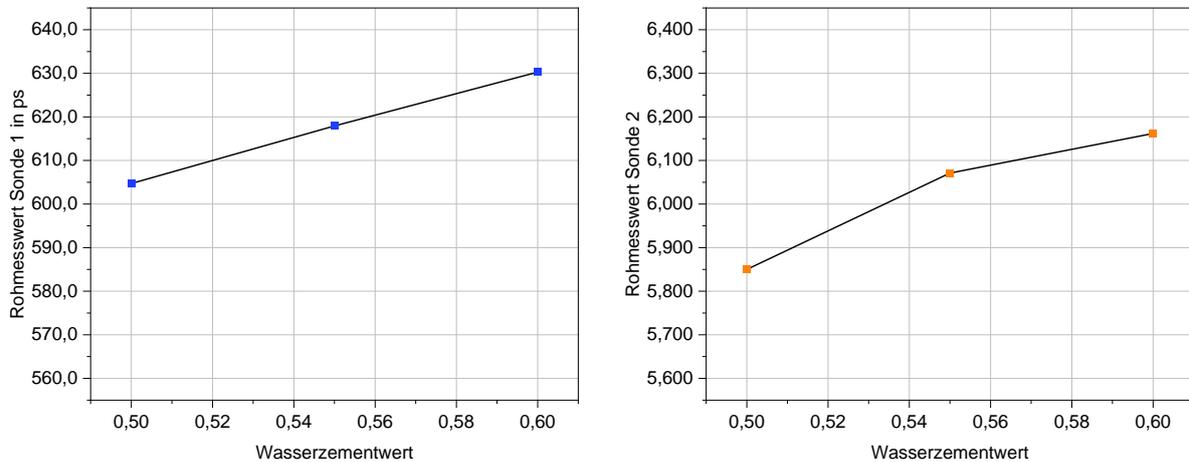


Abbildung 3.3: 3-Punkt- Kalibrierkurven der Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der Zusammensetzung des Referenzbetons

Für die weitere Auswertung wurden deshalb abschnittsweise lineare Funktionen aufgestellt. Diese differenzieren zwischen der Feuchtesonde 1 (Funktion (1) und Funktion (2)) bzw. Feuchtesonde 2 (Funktion (3) und Funktion (4)) sowie dem bekannten Wasserzementwert (Funktion (1) und (3)) und dem bekannten Wassergehalt (Funktion (2) und (4)).

Sonde 1:

$$f(x) = \begin{cases} 264,64 x + 472,38, & 0,50 \leq x \leq 0,55 \\ 246,9 x + 482,1, & 0,55 \leq x \leq 0,60 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0,8285 x + 472,08, & 160,0 \leq x \leq 176,0 \\ 0,7732 x + 481,82, & 176,0 \leq x \leq 192,0 \end{cases} \quad (2)$$

Sonde 2:

$$f(x) = \begin{cases} 4,4136 x + 3,6436, & 0,50 \leq x \leq 0,55 \\ 1,8245 x + 5,0676, & 0,55 \leq x \leq 0,60 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0,0143 x + 3,5535, & 160,0 \leq x \leq 176,0 \\ 0,0057 x + 5,0655, & 176,0 \leq x \leq 192,0 \end{cases} \quad (4)$$

Die erstellten Kalibrierkurven bilden die Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Die Messergebnisse der Frischbetonproben, bei denen jeweils eine Änderung in der Zusammensetzung vorgenommen wurde bzw. alle weiteren Zusammensetzungen, konnten auf diese Weise mit dem Referenzwert verglichen und die Abweichung eingeordnet/bewertet werden.

Die verwendeten Feuchtesensoren bieten die Möglichkeit die in dieser Weise erstellten Kalibrierdaten zu hinterlegen, sodass diese auf zukünftige Messungen angewendet werden, wodurch die direkte Angabe eines Wassergehalts oder des Wasserzementwertes am Gerät möglich ist. Um den Einfluss interner Berechnungsschritte zu vermeiden und die direkte Auswirkung

veränderlicher Anteile einer Zusammensetzung zu überprüfen, wurde im Forschungsprojekt jedoch weiterhin mit den Rohmesswerten der Sonden gearbeitet. Eine Übertragung der Rohmesswerte auf einen Wassergehalt wurde lediglich in einigen Fällen zur Bewertung und zur Herstellung des Praxisbezugs durchgeführt.

Zur Überprüfung, ob eine Erhöhung der Anzahl vorab bestimmter Kalibrierpunkte zur Präzisierung der Kurven führt, wurden in einem zeitlichen Abstand von fünf Monaten zwei zusätzliche Zusammensetzungen geprüft und die Kurven auf 5-Punkt Kalibrierkurven erweitert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Der Kurvenverlauf ist in beiden Fällen von der 3- zur 5-Punkt-Kurve übertragbar und eine Erhöhung der Kalibrierpunkte führt zu einer präziseren Anpassung der Kurve.

Durch die Erweiterung der Kalibriermessungen um die zusätzlichen Wasserzementwerte von 0,53 und 0,58 konnte am Beispiel der Feuchtesonde 1 eine mit der 3-Punkt Kalibrierkurve vergleichbare Messkurve erzielt werden. Die Feuchtesonde 2 zeigte bei der erneuten Erstellung der Kurve in Ergänzung um die weiteren Punkte jedoch bei qualitativ gleichem Verlauf eine deutliche Abweichung zu den vorherigen Messdaten.

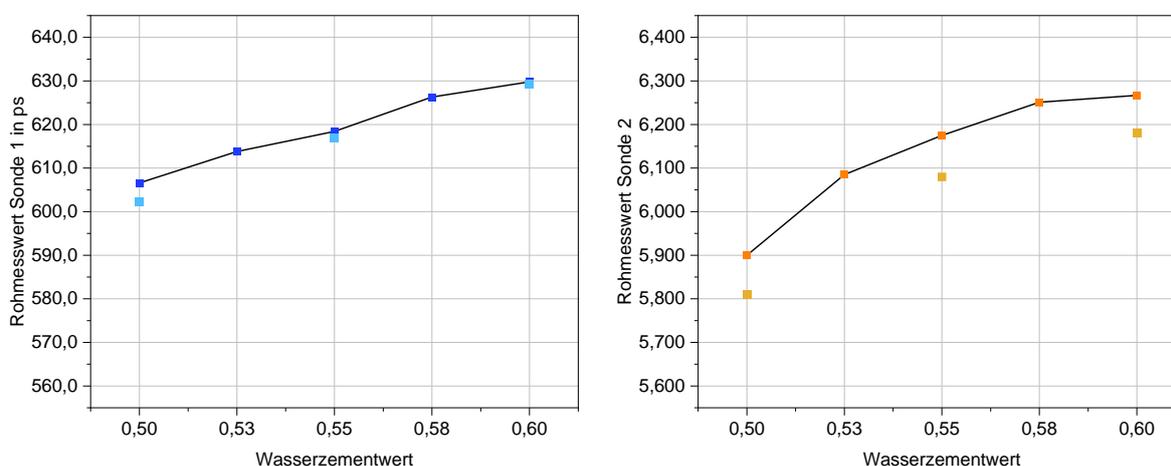


Abbildung 3.4: 3-Punkt- und 5-Punkt Kalibrierkurven der Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der Zusammensetzung des Referenzbetons

Da die einzelnen Messpunkte (zusammengesetzt aus mehreren Messungen) bereits unvermeidbare Schwankungen enthalten, ist eine Abgrenzung der Punkte untereinander mit zunehmender Dichte erschwert. Die Anzahl der Kalibrierpunkte kann in der Praxis also an den jeweiligen Anwendungsfall durch Einbeziehen der Abstände zwischen den Kalibrierpunkten angepasst werden. Durch die anhand der überarbeiteten Referenzzusammensetzung erstellten Kalibrierkurven und die daran abgeleiteten Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des Wassergehalts konnten insbesondere das Größtkorn und die Zementart als beeinflussende Faktoren herausgearbeitet werden (Abweichungen von jeweils $> 10 \text{ kg/m}^3$), die im weiteren Projektverlauf untersucht wurden.

3.2.3.3 Untersuchungen zur Präzision

Die Präzision der Prüfgeräte wurde in mehreren Messreihen untersucht. Da durch die Differenzen der Messergebnisse eine Rückrechnung des kalibrierten Wassergehalts erfolgen soll, ist es unumgänglich, die zu erreichende Präzision innerhalb einer Messreihe (Wiederholbedingungen) oder innerhalb einer Betonzusammensetzung (Vergleichsbedingungen) zu ermitteln. In der nachfolgenden Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse ausgewählter Prüfreihe und der zugehörigen

Parameter bezogen auf die Feuchtesonde 1 dargestellt, wohingegen die Daten zur Feuchtesonde 2 in Tabelle 3.2 zusammengefasst wurden.

Die Daten der Praxisversuche 1, 2-1 und 2-2 sind den Versuchen, welche in Kapitel 3.3 eingehend erläutert werden, zuzuordnen. Es handelt sich dabei jeweils um die gemittelten Daten der vor Ort durchgeführten Messungen (Praxisversuche) sowie der dazu im Labor erstellten Kalibrierkurven (Praxisversuche Kalibrierkurven). Die Daten der Kalibrierkurve Referenz beziehen sich lediglich auf die in Kapitel 3.1 erläuterte Referenzzusammensetzung mit einem Wasserzementwert von 0,55, wohingegen die Daten Wiederholungsmessung der in Abbildung 3.7 dargestellten Versuchsserie entsprechen.

Tabelle 3.1: Präzisionsdaten verschiedener Prüfreiheiten – Feuchtesonde 1

Feuchtesonde 1	Mittelwert	Medianwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Leitungswasser	1010,7	1010,8	0,6	0,06%
Laborversuche				
Kalibrierkurve Referenz	617,6	619,0	8,4	1,40%
Kalibrierkurve Praxisversuche	610,5	611,8	8,2	1,34%
Kalibrierkurve Praxisversuche 2-1	606,6	606,9	8,1	1,32%
Kalibrierkurve Praxisversuche 2-2	638,3	640,2	6,1	0,95%
Wiederholte Messung	620,3	619,0	8,8	1,40%
Praxisversuche				
Praxisversuche 1	649,0	649,3	11,2	1,72%
Praxisversuche 2-1	619,6	618,4	9,1	1,47%
Praxisversuche 2-2	638,6	637,7	10,8	1,69%

Zu Vergleichszwecken wurden mit beiden Sonden Daten an Wasser (bei gleichbleibender Temperatur) ermittelt. Diese zeigen die erreichbaren Werte an einem maximal homogenen Material, was gewissermaßen einer idealisierten Messung entspricht. Dabei sind Einflüsse durch Materialschwankungen, Benetzung der Sondenoberfläche, Lufteinschlüsse, Materialinhomogenitäten

und Temperaturschwankungen ausgeschlossen. Die Messmethoden erreichen in diesem Material einen minimalen Variationskoeffizienten von 0,50 % (Feuchtesonde 2) bzw. 0,06 % (Feuchtesonde 1) und zeigen somit eine Abweichung im Hinblick auf die zu erzielende Präzision, die nicht auf alle Reihen übertragbar sind. Problematisch bei der Messung von Wasser, beziehungsweise bei Messungen im Bereich dieser Rohmesswerte, kann jedoch sein, dass die Prüfgeräte in diesem Bereich eine Messträgheit erreichen und Unterschiede weniger präzise ermitteln würden.

Tabelle 3.2: Präzisionsdaten verschiedener Prüfreiheiten – Feuchtesonde 2

Feuchtesonde 2	Mittelwert	Medianwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Leitungswasser	6,823	6,820	0,034	0,50%
Laborversuche				
Kalibrierkurven	6,140	6,136	0,094	1,55%
Kalibrierkurve Referenz	6,140	6,136	0,094	1,60%
Kalibrierkurve Praxisversuche 1	5,283	5,301	0,100	1,91%
Kalibrierkurve Praxisversuche 2-1	5,723	5,411	0,078	1,43%
Kalibrierkurve Praxisversuche 2-2	5,583	5,676	0,058	0,96%
Wiederholte Messung	6,065	6,056	0,086	1,43%
Praxisversuche				
Praxisversuche 1	5,619	5,621	0,063	1,13%
Praxisversuche 2-1	5,404	5,419	0,061	1,13%
Praxisversuche 2-2	5,552	5,552	0,078	1,40%

Bei Verwendung der Feuchtesonde 1 kann unter Laborbedingungen die Messung niedrigere Variationskoeffizienten erreichen als in den Praxisversuchen, was bei der Feuchtesonde 2 nicht der Fall ist. Diese erreicht beispielsweise in Praxisversuchsreihe 1 und 2-1 unter Praxisbedingungen

einen niedrigeren Variationskoeffizienten als bei der Nachbildung der Zusammensetzung im Labor.

Zur Bewertung der in Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 dargestellten 5-Punkt Kalibrierkurven wurden diese rechts um die zugehörigen Boxplot Diagramme ergänzt. Diese zeigen sowohl den Mittel- als auch den Medianwert der jeweils 15 Einzelmesswerte, welche im Falle der Feuchtesonde 1 durch zwei ermittelte Ausreißer weiter auseinanderliegen. Um diese, den unvermeidbaren Messausreißern geschuldeten Abweichungen Rechnung zu tragen, wurde im Verlauf des Projekts dazu übergegangen, die Auswertung auf Median- anstatt Mittelwerte zu beziehen.

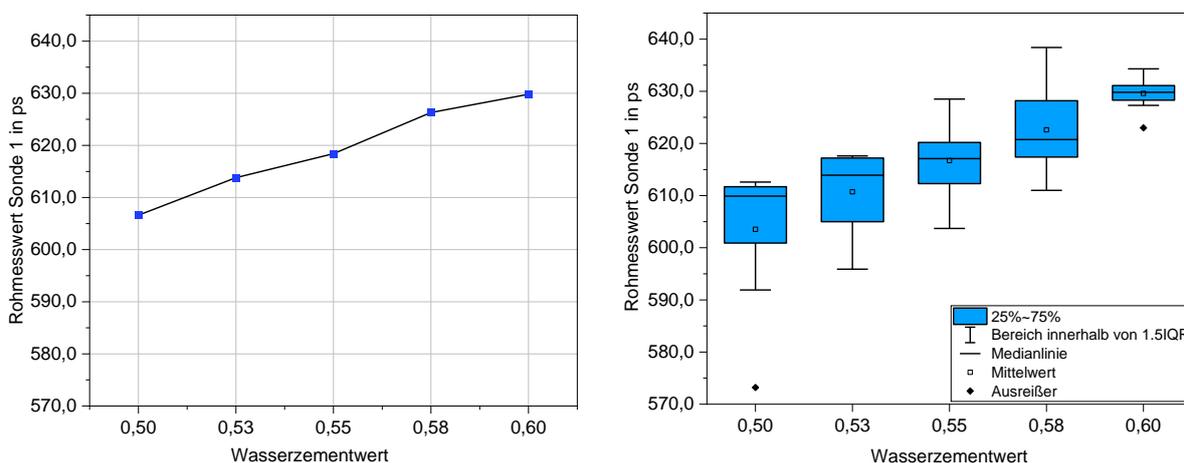


Abbildung 3.5: 5-Punkt Kalibrierkurve der Feuchtesonde 1 (links) und zugehörige Boxplot-Diagramme der fünf Messungen (rechts)

Die farbig gekennzeichneten Boxen geben den Bereich an, in dem 50 % der Messdaten liegen, weshalb diese am oberen und unteren Ende durch das 1. und 3. Quartil begrenzt sind. Die T-förmigen Whisker kennzeichnen entweder den letzten Punkt des 1,5-fachen Interquartilabstands (falls Ausreißer vorliegen) oder geben den Minimal- bzw. Maximalwert an. Die Daten wurden innerhalb der Auswertung erstellt und herangezogen, um die Verteilung und Schwankung der 15 Einzelmesswerte zu analysieren.

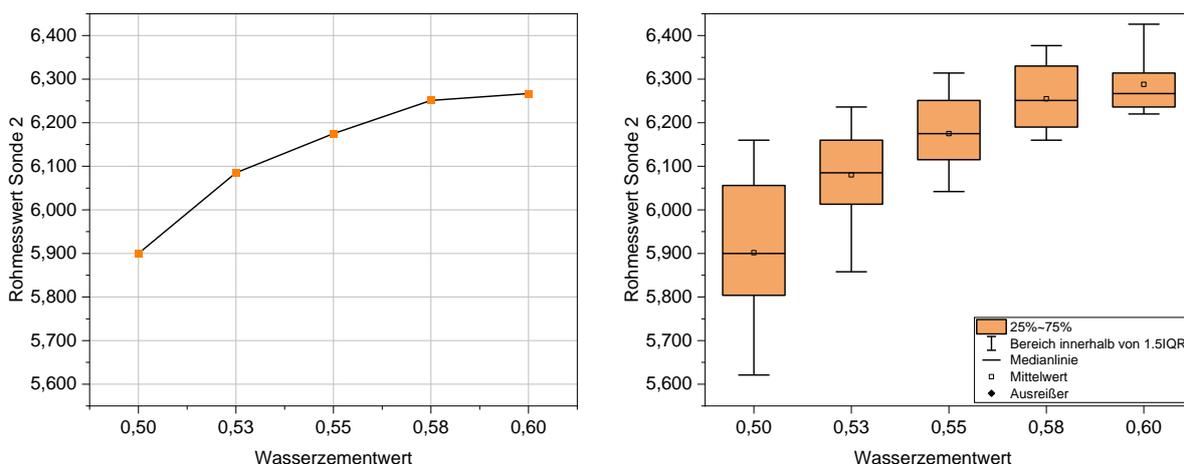


Abbildung 3.6: 5-Punkt Kalibrierkurve der Feuchtesonde 2 (links) und zugehörige Boxplot-Diagramme der fünf Messungen (rechts)

Beide Sonden haben gemeinsam, dass sie – wie in den Tabellen Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 dargestellt – in den wiederholten Messungen einen nahezu identischen Variationskoeffizienten erreichen (1,40 % Feuchtesonde 1, 1,43 % Feuchtesonde 2), was für vergleichbare Präzision unter gleichbleibenden Bedingungen spricht. Wiederholte Messungen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Referenzzusammensetzung innerhalb von zwei Tagen zehnfach unter identischen Randbedingungen hergestellt und gemessen wurde. Zu beachten ist, dass dies nichts über die Empfindlichkeit der Sonden gegenüber Messungen mit variierenden Parametern aussagt. Die in den wiederholten Messungen erzielten Daten sind neben Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 zusätzlich in Abbildung 3.7 aufgeführt. Die dargestellten Median-Rohmesswerte zeigen, dass diese Art der wiederholten Messung bei Verwendung der Feuchtesonde 1 zu einer maximalen Abweichung der Messwerte untereinander von 23 ps führt. Die Messwerte weichen dabei um höchstens 3 % vom Mittelwert der 10 Messungen ab. Der identische Messablauf führt bei der Feuchtesonde 2 zu einer maximalen Abweichung der Rohmesswerte untereinander von 0,11. Die Messwerte weichen um höchstens 1,1 % vom Mittelwert der 10 Messungen ab. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messungen unter gleichbleibenden Bedingungen eine gewisse Stabilität aufweisen. Allerdings sollte beachtet werden, dass, unter Einbezug der Kalibrierkurven, geringe Veränderungen der Rohmesswerte bereits deutliche Auswirkungen auf den Wassergehalt bzw. w/z-Wert haben. Im Fall der Kalibrierkurve von Feuchtesonde 1 (Abbildung 3.5) führt eine Abweichung des Rohmesswertes von 11 ps bereits zu einer Abweichung des w/z-Wertes von 0,05.

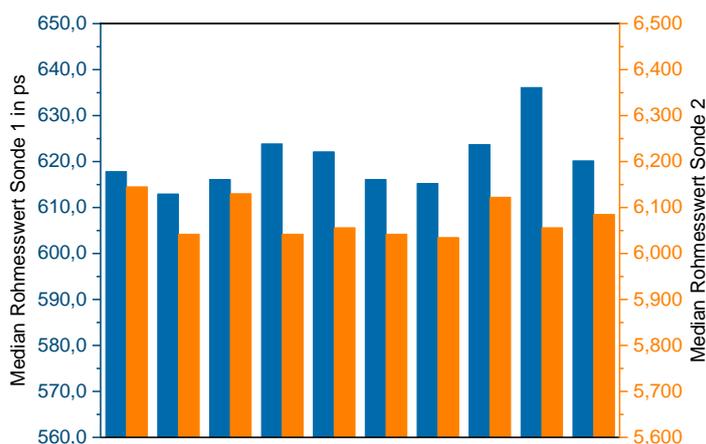


Abbildung 3.7: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 nach zehnfacher Messung einer Zusammensetzung

Diese Werte sind in den weiterführenden Versuchsserien von Relevanz, um einzuschätzen, ob Abweichungen auf prozessbedingte, unvermeidbare Schwankungen oder auf materialspezifische Änderungen der Zusammensetzung zurückzuführen sind.

3.2.3.4 Feuchtemessung an Gesteinskörnung

Messungen der Feuchte von teilwassergesättigten Gesteinskörnungsproben können im Herstellungsprozess genutzt werden, um die enthaltene Wassermenge respektive die dem Frischbeton zuzugebende Wassermenge zu kalkulieren. Bei den Messungen beziehungsweise der Probenpräparation und Auswertung sind im Gegensatz zu der Prüfung in Frischbeton jedoch einige Unterschiede zu beachten.

In den durchgeführten Versuchsreihen wurden den ofentrockenen Gesteinskörnungsproben vordefinierte Wassergehalte zudosiert. Die Proben wurden anschließend im Kleinstmengenmischer

homogenisiert und danach mittels Feuchtemesssonden in festgelegten zeitlichen Abständen geprüft. Eine Kontrolle des Feuchtegehalts erfolgte zum einen über die definierte Wasserzugabe und zum anderen über eine anschließende Rücktrocknung der Materialproben.

Die Ergebnisse (Tabelle 3.3 bis Tabelle 3.5 mit den zugehörigen Abbildungen Abbildung 3.8 bis Abbildung 3.10) zeigen erwartungsgemäß einen Anstieg der Rohmesswerte mit steigender Wassermenge. Eine gleichzeitige tendenzielle Zunahme der Standardabweichung ist durch die Tatsache begründet, dass die Gesteinskörnung oberhalb der vollständigen Sättigung keine Feuchte mehr aufnimmt und diese somit außen anhaftet beziehungsweise sich unten absetzt, wodurch Schwankungen im Messergebnis entstehen. Dies wird in den Abbildungen durch eine starke Zunahme der Rohmesswerte wiedergegeben.

Tabelle 3.3: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Sand 0/2

Sand (0/2)	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Sonde 1	213,0	241,8	274,4	306,7	348,8	417,3
Standardabweichung	0,947	2,907	5,675	8,894	11,532	27,047
Sonde 2	1,243	1,660	2,051	2,413	2,777	3,740
Standardabweichung	0,011	0,034	0,048	0,043	0,105	0,089

Tabelle 3.4: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 2/8

Kies (2/8)	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Sonde 1	207,8	235,6	272,3	275,3	315,2	529,6
Standardabweichung	1,374	3,325	7,904	10,116	37,333	24,165
Sonde 2	1,108	1,503	1,934	2,088	2,377	4,965
Standardabweichung	0,027	0,033	0,081	0,102	0,180	0,170

Tabelle 3.5: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 8/16

Kies (8/16)	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Sonde 1	195,4	229,0	240,3	270,5	509,3	650,3
Standardabweichung	4,239	7,153	9,673	35,059	45,464	27,487

Sonde 2	0,993	1,443	1,619	1,740	3,113	5,521
Standardabweichung	0,049	0,072	0,142	0,165	0,435	0,278

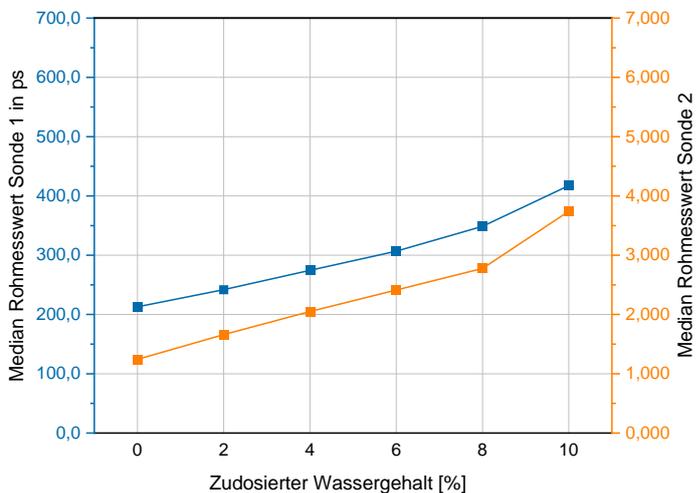


Abbildung 3.8: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Sand 0/2

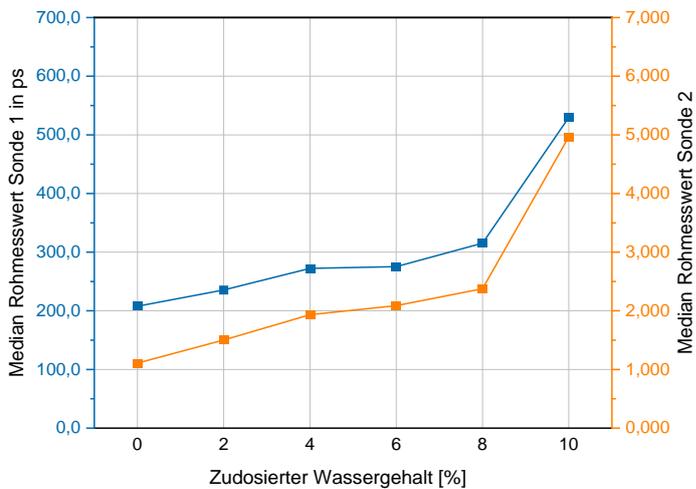


Abbildung 3.9: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 2/8

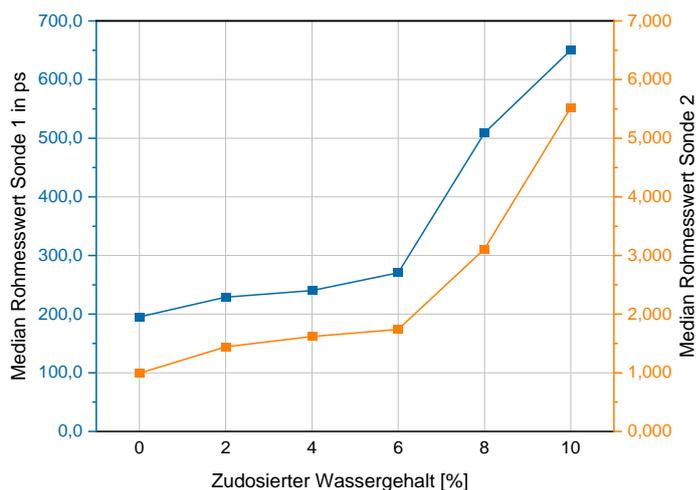


Abbildung 3.10: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 8/16

Aus diesem Grund wurde in den folgenden Versuchsserien darauf geachtet, dass - vor allem im Hinblick auf die Erstellung belastbarer Kalibrierkurven - die Wasseraufnahme nach 24 h als maximal geprüfte Feuchte gilt.

Aus den ermittelten Daten wird sichtbar, dass feinere Gesteinskörnungen gegenüber größeren Gesteinskörnungen bei niedrigen Feuchtegehalten höhere Rohmesswerte erzielen, was sich mit zunehmendem Wassergehalt umkehrt. Dies ist gegebenenfalls darauf zurückzuführen, dass die höhere Packungsdichte zu geringeren Lufteinschlüssen im Messfeld der Feuchtesensoren führt. Dass der Rohmesswert bei 10 % Feuchte umschlägt und in der größeren Gesteinskörnung maximal ist, kann auf die wassergefüllten Zwischenräume bei Übersättigung zurückzuführen sein beziehungsweise auf die geringere Oberfläche, die mit steigendem Korndurchmesser an der Sondenoberfläche anliegt.

Darauffolgende Messungen, die in einem auf die Wasseraufnahme begrenzten Feuchtebereich (ca. 1-3 %) durchgeführt wurden, führten ebenfalls zu den erwartungsgemäß steigenden Rohmesswerten mit zunehmender Materialfeuchte und könnten als Kalibrierkurve des jeweiligen Materials herangezogen werden.

3.2.3.5 Untersuchungen Frischbeton

Zur Untersuchung des Einflusses betontechnologischer Parameter auf die Messergebnisse wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Temperatur, die Wasserbeschaffenheit, die Gesteinskörnung, die Zementart und die zugegebenen Zusatzmittel variiert wurden.

a) Beeinflussung durch die Temperatur

Zur Untersuchung des Einflusses der Proben temperatur auf das Messergebnis der Feuchtemesssonden wurden verschiedene Versuchskonzepte erarbeitet. Neben Wasser, das temperiert wurde, wurden zusätzlich Untersuchungen mit feuchtem temperiertem Sand und Frischbeton (Temperierung von Wasser und Gesteinskörnung vor dem Mischprozess) durchgeführt. Auszugsweise sind in Abbildung 3.11 die Ergebnisse der Messung in Wasser und einem Sandgemisch mit 10 % Feuchte dargestellt.

Die Erwartung eines abnehmenden Messwerts bei steigender Temperatur in Wasser, die auf die zunehmende Eigenbewegung der Ladungsträger bei höherer innerer Energie zurückzuführen ist,

konnte durch die Untersuchung des temperierten Wassers in einem Temperaturbereich von 19-35,8 °C bestätigt werden. Die sinkende Permittivitätszahl bei steigender Temperatur resultiert demnach in einem sinkenden Rohmesswert.

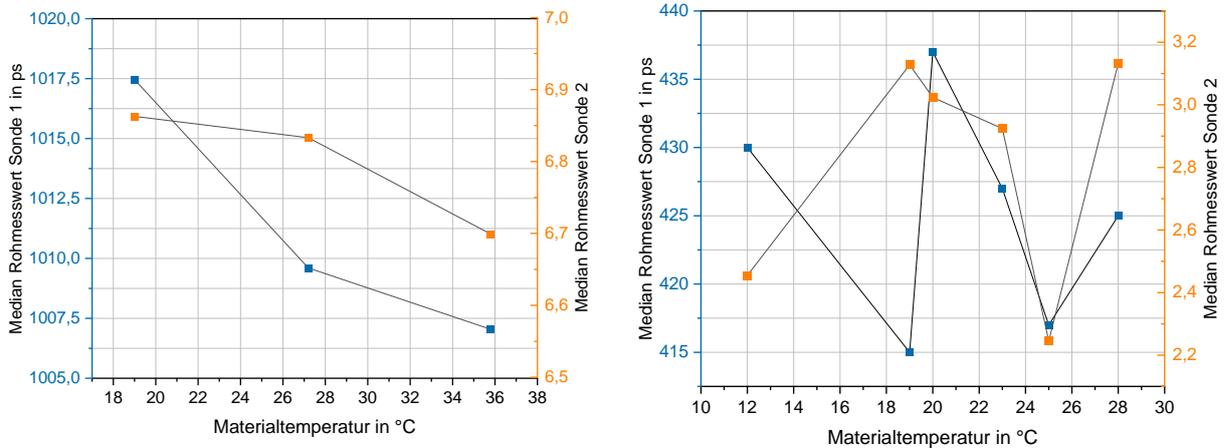


Abbildung 3.11 Rohmessergebnis der Feuchtemesssonden in Abhängigkeit von der Proben temperatur in Leitungswasser (links) und teilwassergesättigtem Sand (10 %) (rechts)

Die Abnahme der Permittivitätszahl des Wassers bei steigender Temperatur lässt sich nicht auf die Betonausgangsstoffe übertragen. Beide Sonden zeigen in einem Temperaturbereich von 12-28 °C keine Abhängigkeit von der Temperatur in feuchter Gesteinskörnung. Der Einfluss, den die Temperatur im Wasser hat, reicht nicht aus, um sich im Materialgemisch durchzusetzen. Dies ist ebenfalls auf Frischbetonproben übertragbar.

b) Beeinflussung durch das Wasser

Da die Leitfähigkeit eines Materials die Messergebnisse der Feuchtemesssonden beeinflussen kann (siehe Kapitel 2.4.2), wurde der Einfluss von demineralisiertem Wasser auf die Rohmesswerte geprüft. Der Unterschied, der zwischen Messungen in Leitungswasser im Vergleich zu demineralisiertem Wasser festgestellt werden konnte, beträgt lediglich 0,8 ps (Feuchtesonde 1) bzw. 0,04 bei einer Proben temperatur von 22 °C. Dies stellt im Hinblick auf die verfahrensbedingten Abweichungen der Messgeräte eine zu vernachlässigende Abweichung dar, weshalb die Leitfähigkeit des verwendeten Wassers nicht in der Auswertung der Messdaten zu berücksichtigen ist.

c) Beeinflussung durch die Gesteinskörnung

Die Tatsache, dass die elektrische Feldverteilung exponentiell verläuft, zeigt, dass die Intensität des elektromagnetischen Feldes an der Sondenoberfläche einen Maximalwert erreicht und mit zunehmender Entfernung abnimmt [28]. Durch Inhomogenität des Materials und veränderliche Größenverteilungen anliegender Gesteinskörnung, kann demnach eine überproportionale Beeinflussung des Messfeldes erfolgen. Aus diesem Grund spielt die Gesteinskörnung bei der Messung des Wassergehalts von Frischbeton mittels indirekter Messtechnik eine entscheidende Rolle, die in die Versuchsserien aufgenommen wurde.

Ein Auszug der ermittelten Daten ist in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Die dargestellten Ergebnisse wurden an Betonzusammensetzungen ermittelt, die sich lediglich in der verwendeten Gesteinskörnung unterschieden.

Tabelle 3.6: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von Kies (Größtkorn 16 mm), Kies (Größtkorn 8 mm) und Splitt (22 mm)

	Referenz (Kies, Größtkorn 16 mm)	Größtkorn 8 mm	Splitt 22 mm
Sonde 1	619,0	605,0	651,0
Sonde 2	6,136	5,829	6,295

Die Daten zeigen, dass durch die Veränderung des Größtkorns bei der Untersuchung von Frischbeton eine Veränderung des Messwertes hervorgerufen wird. Dies ist vermutlich auf die Umverteilung des Zementleims resultierend aus dem erhöhten Wasseranspruch der Sieblinie durch Vergrößerung der auf das Volumen bezogenen Oberfläche zurückzuführen.

Die Verwendung eines Größtkorns von 8 mm im Vergleich zu 16 mm führt bei Verwendung der Kalibrierkurven zu einer Abweichung des errechneten Wassergehalts von jeweils mehr als 15 kg/m³, was die tolerierbare Abweichung überschreitet und somit zeigt, dass das Größtkorn einen Faktor darstellt, den es in der Kalibrierung abzubilden gilt. In weiteren Versuchen wurde deutlich, dass mit zunehmender Feinheit der Sieblinie ein Sinken der Rohmesswerte einhergeht. Die Verwendung von gebrochenem Korn anstelle des Kieses der Referenzmischung zeigt ebenfalls deutliche Abweichungen, die die verfahrensbedingten Schwankungen überschreiten und deshalb einer eigenen Kalibrierung bedürfen.

Der Trocknungsgrad der verwendeten Gesteinskörnung (ofentrocken, oberflächentrocken, wassergesättigt) führte in den Versuchsreihen hingegen nicht zu einem reproduzierbaren Einfluss auf das Messergebnis, sodass die Versuchsreihen im weiteren Verlauf weitestgehend mit ofentrockener Gesteinskörnung durchgeführt wurden, um den eingewogenen Wassergehalt möglichst präzise angeben zu können. Der in der Praxis zu erwartende Feuchtegehalt der Gesteinskörnung ist jedoch trotzdem in der Kalibrierung zu berücksichtigen, um eine möglichst praxisnahe Zusammensetzung der Ausgangsstoffe zu erhalten. Der Sättigungsgrad der Gesteinskörnung ist tendenziell bei der Bestimmung der Feuchte der Gesteinskörnung und der dazugehörigen Kalibrierung durch die Wasseraufnahme von gesteigerter Bedeutung.

d) Beeinflussung durch den Zement

Die Zementart beeinflusst durch den Anteil an Ionen, der bei Wasserzugabe durch die Hydratation gelöst wird, die Leitfähigkeit des untersuchten Materials maßgeblich. Da die Leitfähigkeit, wie in Kapitel 2.4.2 erläutert, die Messwerte der Feuchtesensoren beeinflusst, wurde der Einfluss der Zementart im Rahmen verschiedener Versuchsserien untersucht.

In einer ersten Untersuchungsreihe wurde die Referenzzusammensetzung (die mit einem CEM II/B-S 42,5 N hergestellt wurde) jeweils zweifach mit einem CEM I 42,5 N und einem CEM III/B42,5 N-LH/HS/NA hergestellt, um erste Auswirkungen zu untersuchen. Die gemittelten Medianwerte der Rohmessergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Tabelle 3.7: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von CEM II/B-S 42,5 N, CEM I 42,5 N, CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA

	Referenz (CEM II/B-S 42,5 N)	CEM I 42,5 N	CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA
Sonde 1	619,0	621,1	606,9
Sonde 2	6,136	5,355	4,971

Die auf den physikalischen Hintergründen beruhenden Annahmen, dass eine Veränderung der Zementart eine Abweichung in den Messergebnissen bewirkt, können mit den erzielten Messwerten (insbesondere den Ergebnissen der Feuchtesonde 2) bestätigt werden.

Der auf Grundlage der Kalibrierkurven aus den Rohmessergebnissen ermittelte Wert für den Wassergehalt weicht bei Feuchtesonde 1 um $3,2 \text{ kg/m}^3$ (CEM I) bzw. $17,6 \text{ kg/m}^3$ (CEM III) von den tatsächlichen $176,0 \text{ kg/m}^3$ ab, wohingegen durch Feuchtesonde 2 aufgrund der hohen Abweichung gar keine Zuordnung mithilfe der Kalibrierkurven möglich ist.

Darauf aufbauend wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss des Zementes genauer analysieren und Hintergründe aufdecken zu können. Die weiteren Versuchsserien zum Einfluss der Zementart wurden so aufgebaut, dass Mischungen aus Zementleim mit Sand in bekannten Anteilen hergestellt wurden, bei denen jeweils ein vordefinierter Anteil des Zementes durch Hüttensand, Kalksteinmehl oder eine Kombination ausgetauscht wurde. Als Zement wurde in diesen Versuchen ein CEM I 52,5 R verwendet. In den Abbildungen Abbildung 3.12, Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 zeigt sich, dass die Verringerung des Zementanteils im Falle der Feuchtesonde 2 eine deutliche Reduktion des Rohmesswertes bewirkt, wohingegen sich bei Feuchtesonde 1 zwar ebenfalls ein reduzierter Wert abzeichnet, dies aber erst bei höheren Austauschquoten zu signifikanten Unterschieden führt.

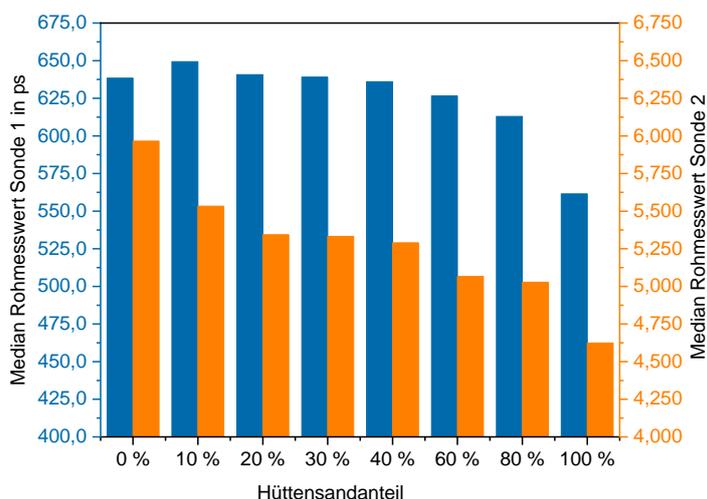


Abbildung 3.12: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Hüttensandanteil

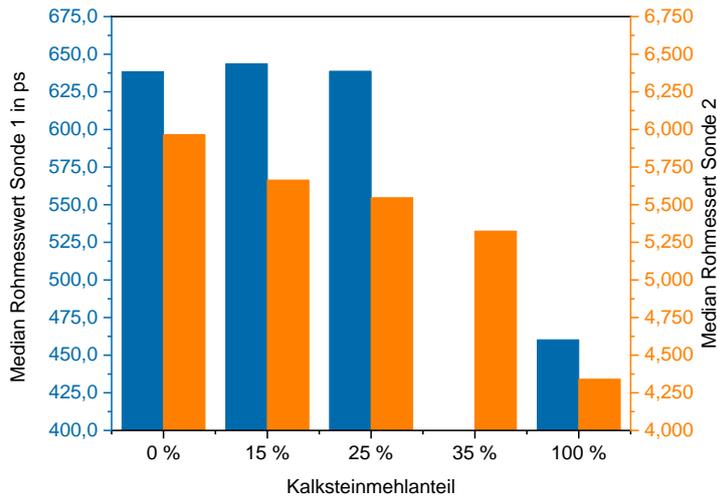


Abbildung 3.13: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Kalksteinmehlsandanteil

Auch eine Kombination von Hüttensand und Kalksteinmehl (CaCO_3) als Austauschstoff des Portlandzementes bewirkt insbesondere bei Feuchtesonde 2 eine Abnahme des Rohmesswertes. Diese Entwicklung stimmt mit wenigen Ausnahmen auch mit der Messung der Leitfähigkeit der Materialien überein.

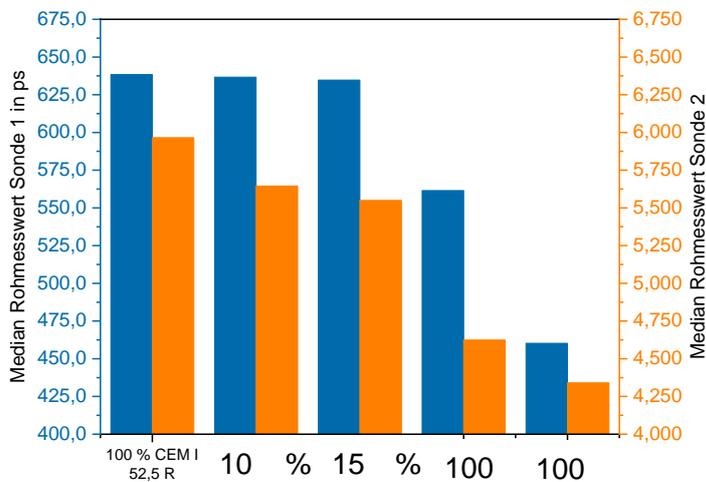


Abbildung 3.14: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Hüttensand- und Kalksteinmehlsandanteil

Durch eine Gegenüberstellung der Messergebnisse der Feuchtemesssonden mit den Materialeigenschaften zeigt sich, dass beispielsweise die Mahlfeinheit mit der Entwicklung der Messwerte korreliert. Eine Erhöhung der Mahlfeinheit um ca. $1.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ führt zu einer Herabsetzung des Messwertes um ca. 3 %.

Die fortlaufende Untersuchung einer festgelegten Zementart mit jeweils gleichbleibender Herkunft in einem Gesamtintervall von zwölf Wochen zeigte, dass insbesondere die Feuchtesonde 2 Abweichungen im Rohmesswert von bis zu 0,475 liefert. Bezogen auf die durchschnittliche

Standardabweichung des Referenzwertes der Kalibrierkurve von 0,094, die innerhalb der 15 Einzelmessungen durchschnittlich mit dieser Sonde erzielt wurde, zeigt dies also eine höhere Abweichung.

Die Differenzen der Feuchtesonde 1 bleiben in dieser Messreihe im Rahmen der aus den Einzelwerten des Referenzpunktes ermittelten und damit zu erwartenden Standardabweichung außer bei den Messungen des CEM II/B-S 42,5 N, in denen die maximale Differenz 10,9 beträgt und damit die Standardabweichung von 8,4 leicht überschreitet. Da beide Sonden jedoch die maximale Differenz an den gleichen Proben ermitteln, scheint die Zusammensetzung dieser Zemente tatsächliche Abweichungen aufzuweisen.

Tabelle 3.8: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von CEM II/A-LL 42,5 N, CEM II/B-S 42,5 N und CEM I 42,5 R

CEM II/A-LL 42,5 N	1	2	3	4	5	6	7
Median Rohmesswert Sonde 1 in ps	618,6	616,3	622,3	616,5	619,9	618,0	616,6
Median Rohmesswert Sonde 2	5,231	5,288	5,334	5,321	5,276	5,181	5,210

CEM II/B-S 42,5 N	1	2	3	CEM I 42,5 R	1	2
Median Rohmesswert Sonde 1 in ps	612,6	621,0	623,5	Median Rohmesswert Sonde 1 in ps	623,3	624,2
Median Rohmesswert Sonde 2	4,889	5,022	5,364	Median Rohmesswert Sonde 2	5,346	5,247

Die Untersuchungsreihen bestätigen, dass die Rohmessergebnisse der Sonden stark durch die Art des verwendeten Zements beeinflusst werden. Die Beeinflussung kann zunächst auf die Zusammensetzung und somit die einzelnen Bestandteile des Zements zurückgeführt werden. Diese führt zu variierenden Leitfähigkeiten des Materials was die Messsignale verändert. Des Weiteren führt die Mahlfineinheit des Zementes ebenfalls zu Abweichungen in den gemessenen Signalen, sodass die Rohmesswerte abweichen. Wird ein Zement aus einem Werk über einen längeren Zeitraum bezogen, fallen die Abweichungen geringer als bei der Gegenüberstellung verschiedener Zemente aus. Abweichungen innerhalb einer Zeit von beispielsweise 12 Wochen sind jedoch den Ergebnissen nach zu urteilen nicht vollends auszuschließen, was sich auf die zu empfehlenden Kalibrierintervalle auswirkt. Feuchtesonde 2 zeigt sich in den Untersuchungsreihen sensibler auf geringe Abweichungen die Leitfähigkeit oder die Zementzusammensetzungen betreffend zu reagieren. Dies führt zu signifikanteren Abweichungen im prognostizierten Wassergehalt. Feuchtesonde 1 zeigt zwar ebenfalls Unterschiede zwischen den verschiedenen Zementarten an, diese fallen aber vergleichsweise geringer aus.

e) Beeinflussung durch Calcium-, Natrium- und Kaliumhydroxid

Zur präziseren Einordnung der Einflussnahme der Zementzusammensetzung auf die Rohmessergebnisse der Feuchtesensoren beider Messprinzipien wurden zusätzlich Lösungen der

Hydroxide Calcium- ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Natrium- (NaOH) und Kaliumhydroxid (KOH) in veränderlicher Konzentration geprüft. Durch die Zugabe von Wasser entstehen aus den löslichen Hydroxiden (NaOH und KOH) Laugen, wohingegen aus dem weniger leicht löslichen Calciumhydroxid eine alkalische Suspension entsteht.

Calciumhydroxid wird beispielsweise in geringen Mengen bereits in der ersten Phase der Hydratation, also anschließend an die Wasserzugabe zum Zement, gebildet. In den Versuchsserien, in denen die Lösungstemperatur in allen Messungen zwischen 22 °C und 24 °C lag, steigt der Rohmesswert der Feuchtesonde 2 mit zunehmender Calciumhydroxidkonzentration an, wohingegen der Messwert in Kalium- und Natriumhydroxidlösung mit zunehmender Konzentration sinkt. Dieser Verlauf ist in Abbildung 3.15 veranschaulichend dargestellt. Die geprüften Lösungen weisen abnehmende pH-Werte mit abnehmender Konzentration auf, die mit den Tendenzen der Rohmesswerte übereinstimmen. So hat die Kaliumhydroxidlösung mit 13,04 den höchsten pH-Wert, woraufhin Natriumhydroxid mit einem Wert von 12,26 folgt. Der niedrigste pH-Wert wurde an der Calciumhydroxidlösung mit 11,76 gemessen.

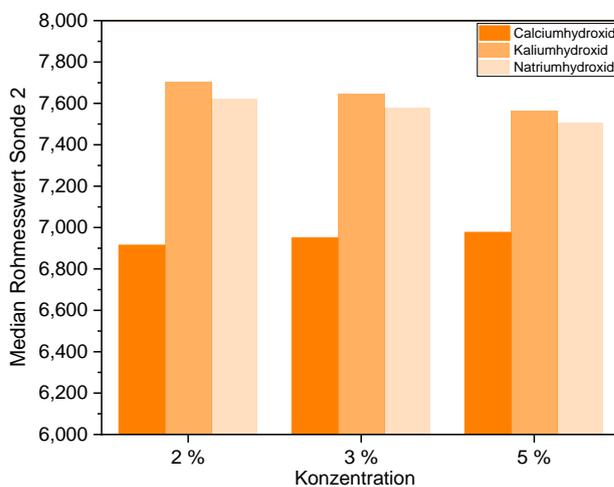


Abbildung 3.15: Darstellung des Einflusses der Konzentration von Calcium-, Kalium- und Natriumhydroxid auf das Medianmessergebnis von Feuchtesonde 2

Die Rohmesswerte unterschreiten bei Calciumhydroxid die Werte der Kaliumhydroxid- und Natriumhydroxidlösungen deutlich. Dies ist möglicherweise eine Begründung dafür, dass die Feuchtesonde 1 in dieser Versuchsserie lediglich in der Calciumhydroxidlösung Messwerte erzielte (ca. 976,8 ps (2 %), 965,6 (3%) und 944,3 (5 %)), da die obere Messgrenze bei den anderen Lösungen gegebenenfalls überschritten wurde. Die Entwicklung ist demnach gegenläufig zu den Messergebnissen der Mikrowellenfeuchtesonde. Über die weiteren Lösungen kann aufgrund des möglicherweise zu hohen Messwerts, der zu einer Fehlmessung führt, keine Aussage getroffen werden. Die abzuleitenden Tendenzen zeigen, dass die Konzentration an Hydroxiden die Frischbetonmesswerte beeinflussen kann und damit als einer der Parameter anzusehen sind, die Schwankungen im Messergebnis durch veränderliche Zementzusammensetzungen in einem geringen Maße mit beeinflussen können.

f) Beeinflussung durch Zusatzmittel (Luftporenbildner, Fließmittel)

Der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Messergebnisse von Feuchtemesssonden zur Bestimmung des Wassergehalts in Frischbeton ist unter verschiedenen Gesichtspunkten zu

betrachten. Zum einen ist eine Beeinflussung des Messwertes durch die Zusammensetzung beziehungsweise einzelne Bestandteile denkbar, zum anderen kann eine mögliche Veränderung des Messsignals auf die abweichenden Frischbetoneigenschaften, die durch das Zusatzmittel hervorgerufen werden, zurückzuführen sein. Um beiden Ursächlichkeiten Rechnung zu tragen, wurden zwei verschiedene Prüfprogramme entwickelt. Zur Überprüfung von Auswirkungen aufgrund des Zusatzmittels, wurde teilwassergesättigten Sandproben eine variierende Menge an Luftporenbildner (angegebene Menge bezogen auf den Zementanteil, der bei einem Wasserzementwert von 0,55 der 10 % wassergesättigten Probe zugegeben werden würde) zugegeben.

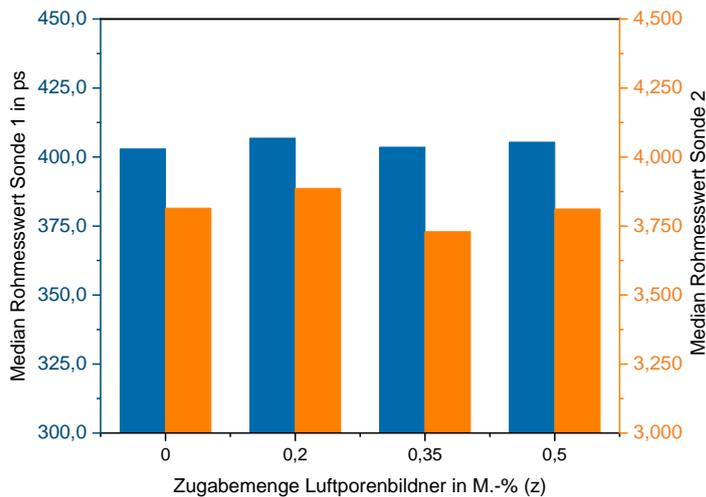


Abbildung 3.16: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit von der Luftporenbildnerzugabemenge

Die zusammenfassende Darstellung in Abbildung 3.16 zeigt, dass die Steigerung der zugegebenen Menge an Luftporenbildner tendenziell keinen Einfluss auf das gemessene Ergebnisse beider Feuchtesensoren bewirkt. Leichte Schwankungen, werden bei der Mikrowellentechnik zwar aufgezeichnet, diese überschreiten die verfahrensbedingten Schwankungen jedoch kaum und sind demnach nicht zweifelsfrei auf die Zugabe des Zusatzmittels zurückzuführen. Die Untersuchungen wurden ebenfalls auf Frischbetonproben übertragen. Dabei wurden zusätzlich, wie in Kapitel 3.1.3, Fließmitteldosierungen von 0-0,35 M.-% bezogen auf den Zementanteil untersucht. Auch dort konnte keine Beeinflussung der Messergebnisse bei ansonsten möglichst konstanten Frischbetoneigenschaften festgestellt werden.

Werden die Auswirkungen der Zugabe von Zusatzmitteln jedoch im Hinblick auf die daraus resultierenden Veränderungen der Frischbetoneigenschaften analysiert, ist die Einschätzung in gewissem Maße anzupassen. Durch die getesteten Zusatzmittel Luftporenbildner und Fließmittel sind, je nach Dosierungsmenge, Veränderungen in der Frischbetonrohddichte (LP) und der Konsistenz sowie der Verarbeitbarkeit (FM und LP) zu erwarten. In Versuchsreihen, die Konsistenz betreffend, zeigt sich, dass eine steifere Konsistenz in einer Vielzahl der Messungen zu niedrigeren Rohmesswerten und einer zum Teil deutlichen Erhöhung der Standardabweichung führt. Dies ist auf die erschwerte Verdichtung des Frischbetons auf der Sondenoberfläche und die dadurch entstehenden Lufteinschlüsse zurückzuführen. Beim Ermitteln der Kalibrierdaten ist demnach die zu erwartende Konsistenz der später zu untersuchenden Frischbetonproben möglichst mit einzu beziehen, um die Abweichungen zu minimieren.

Eine weitere Frischbetoneigenschaft, die durch die Zugabe der untersuchten Betonzusatzmittel verändert wird, ist die Frischbetonrohddichte, die sich mit dem Anteil enthaltener Luftporen in der Probe verändert. Diese Kenngröße (Materialdichte) ist bereits in der Literatur [11] als Einflussfaktor aufgeführt und kann beispielsweise in der verwendeten Feuchtesonde 1 als Eingangsgröße angegeben werden, sodass diese bei Verwendung der internen Berechnung und Ausgabe des Wassergehalts einbezogen wird. Die Beeinflussung der Messung ist auch darauf zurückzuführen, dass die Sonden spezifische effektive Eindringtiefen in das Material aufweisen. Bei Feuchtesonde 1 liegt dieser Wert beispielsweise bei ungefähr 50 mm um die Sondenoberfläche, bei Feuchtesonde 2 dringt das Messsignal circa 100 mm tief ein. Wird die Betonrohddichte (bspw. durch steigenden Luftgehalt) verringert, verringert sich der Anteil der Betonmenge, die im Messfeld der Sonde von der elektrischen Welle durchdrungen wird, was zu einer niedrigeren Permittivitätszahl führen kann und somit in einem niedrigeren Rohmesswert resultiert. Bei Verwendung der geprüften Zusatzmittel ist somit deren Auswirkung auf Konsistenz, Frischbetonrohddichte und Verarbeitbarkeit mit einzubeziehen wohingegen deren Zusammensetzung die Messtechnik nicht beeinflusst.

3.3 Arbeitspaket 4 - Erprobung des Prüfverfahrens unter Praxisbedingungen

3.3.1 Ziel

Ziel des vierten Arbeitspaketes ist die Erprobung der in AP 3 definierten Prüfmethode unter Praxisbedingungen.

3.3.2 Ablauf

Der unter Laborbedingungen entwickelte und optimierte Verfahrensablauf wurde in zwei Praxisversuchsreihen mit kooperierenden Transportbetonwerken vertiefend erprobt. In einer ersten Versuchsreihe konnten die Versuche im Rahmen der Betonage der Innenschale (Sohle) einer Tunnelbaustelle durchgeführt werden. Eine erste Probe wurde im entsprechenden Transportbetonwerk genommen und untersucht, die weiteren Proben wurden anschließend auf der Baustelle vor Ort geprüft. Die Probenahme erfolgte aus verfahrensbedingten Gründen direkt nach Ankunft des jeweiligen Transportbetonfahrzeuges. Es wurde jeweils sowohl eine Probe zur Bestimmung des Wassergehalts mithilfe der beiden Feuchtesonden, zum Teil eine Probe zur Bestimmung der Frischbetonrohddichte und des Luftgehalts als auch ein Materialanteil zur Bestimmung des Wassergehalts mittels Darrverfahren entnommen. Die Prüfung erfolgte analog zu der Vorgehensweise, die vorab unter Laborbedingungen getestet wurde. Zur Einordnung der ermittelten Werte wurden Materialproben der Ausgangsstoffe aus dem Transportbetonwerk genutzt, um anschließend unter Laborbedingungen die zugehörigen Kalibrierkurven anhand der Mischungsberechnung des Herstellers herzustellen und mit den Daten der Praxisversuche abzugleichen.

Der zweite Teil der Praxisversuchsreihe erfolgte in einem Transportbetonwerk, in dem sechs Proben zwei verschiedener Zusammensetzungen genommen werden konnten. Auch hier wurde die Probe dem Transportbetonfahrzeug entnommen (Probe für Wassergehaltsbestimmung mit Feuchtemesstechnik und Darren, Frischbetonrohddichte und Luftgehalt). Die Kalibrierkurven wurden ebenfalls nachträglich im Labor mit dem Material der Praxisversuche erstellt.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.3.1 Praxisversuche 1

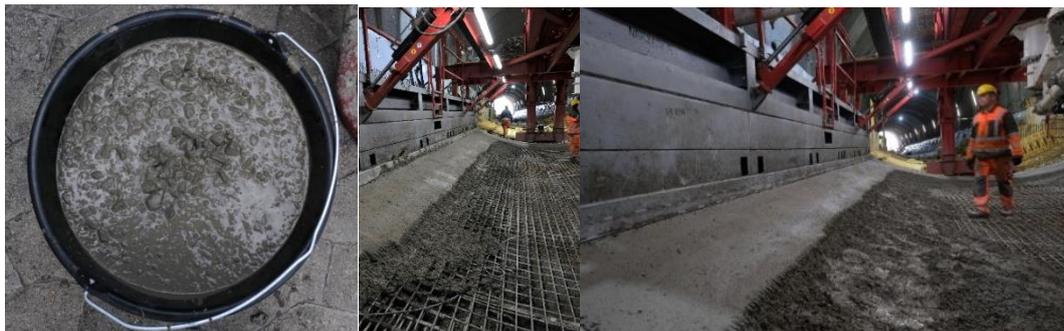


Abbildung 3.17: Betonage der Sohle der Innenschale des Tunnels und Frischbetonprobe 1

Die geprüften Frischbetonproben setzen sich aus Sand 0/2, Kies 2/8, Splitt 8/16 und einem CEM II/A-LL 42,5 N zusammen. Die Medianmesswerte der daraus unter Laborbedingungen hergestellten Proben mit gleichbleibendem Zementgehalt und variierendem Wassergehalt sind in Abbildung 3.18 (Feuchtesonde 1) und Abbildung 3.19 (Feuchtesonde 2) jeweils links als Kalibrierkurve dargestellt. Die auf der Baustelle ermittelten Messdaten sind in den Abbildungen jeweils rechts aufgeführt. Dabei werden die Soll-Wassergehalte des angelieferten Transportbetons den Rohmesswerten der Messungen gegenübergestellt.

Grundsätzlich war die Zusammensetzung des Betons bei allen Lieferungen einheitlich, jedoch sollten die Wassergehalte erst auf der Baustelle final eingestellt werden. Die Soll-Wassergehalte der Transportbetonlieferungen unterschieden sich daher. In den Messungen war allgemein zu erwarten, dass die Lieferungen mit geringerem Wassergehalt auch mit einem geringen Rohmesswert einhergehen. Die unter Laborbedingungen ermittelten Messdaten und die auf der Baustelle erhobenen Daten sollten einen vergleichbaren Verlauf zeigen. Mit zunehmendem Wassergehalt sollte auch der Rohmesswert ansteigen. Wie in den Abbildungen Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 zu erkennen ist, ist dies allerdings nicht der Fall. Die abweichenden Verläufe der Rohmesswerte liegen möglicherweise darin begründet, dass die tatsächlichen Wassergehalte der Lieferungen nicht mit den Soll-Wassergehalten übereinstimmten oder dass die Prüfzeitpunkte nicht einheitlich gewählt wurden.

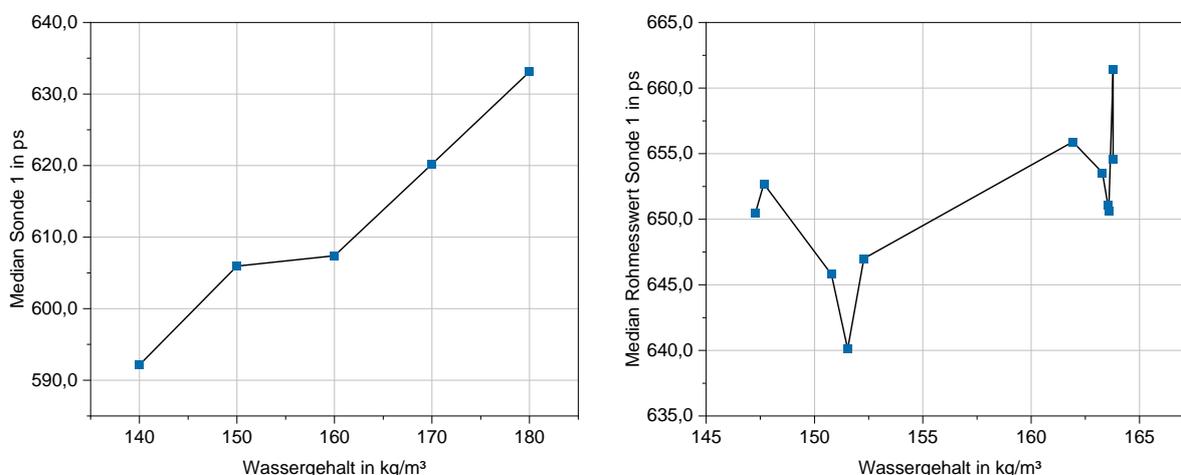


Abbildung 3.18: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 der im Labor erstellten Kalibrierkurve (links) und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1 (rechts)

Zu erkennen ist, dass die Kurven beider Sonden einen qualitativ ähnlichen Verlauf zeigen. Die Abweichungen zu den Kalibrierkurven sind nach näheren Untersuchungen wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Proben im Labor circa fünf Minuten nach dem Mischen erhoben wurden, wohingegen die Messung auf der Baustelle aufgrund des Transportwegs und Wartezeiten auf der Baustelle bis zu 50 Minuten nach dem Mischen stattfanden. Mit dem Hintergrund der in den Laborversuchen analysierten Einfluss des Messzeitpunkts (vgl. Kapitel 3.2.3.1), übersteigen die Messwerte in der Praxis die Daten der erstellten Kalibrierkurven. Dies wurde zur Optimierung des Prüfverfahrens für die zweite Praxisversuchsreihe in den Ablauf aufgenommen, um den Grund der Abweichungen in dieser Prüfreihe zu bestätigen.

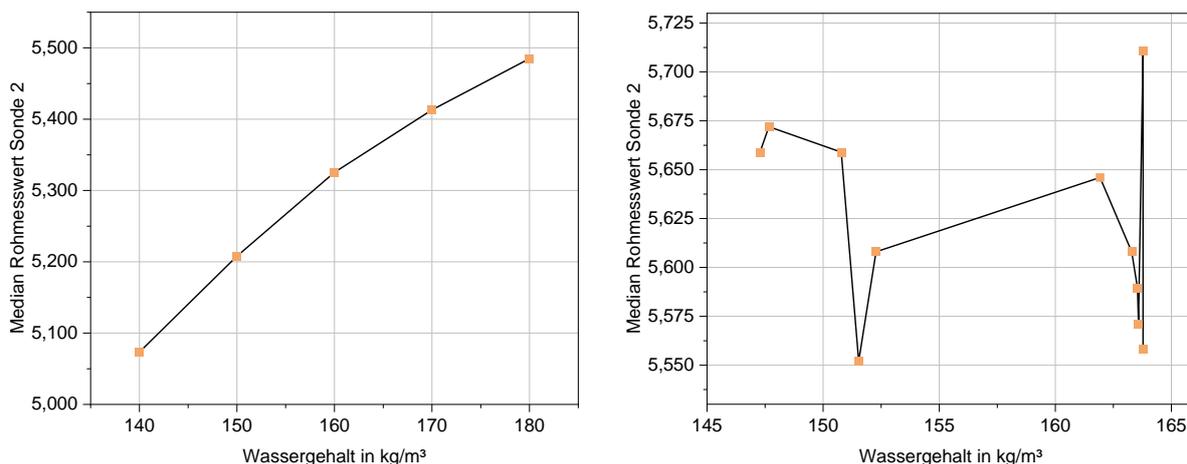


Abbildung 3.19: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 2 der im Labor erstellten Kalibrierkurve (links) und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1 (rechts)

Werden die Messdaten der beiden Feuchtesonden 1 und 2 gegenübergestellt (Abbildung 3.20), zeigt sich, dass beide Geräte, die auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhen, in den Praxisversuchen die gleichen Messtendenzen aufzeigen. Dies spricht dafür, dass die Proben möglicherweise aufgrund der Probenahme (die verfahrensbedingt direkt das erste Probematerial aus dem Fahrmischer enthielten) schwanken und nicht vollends homogenisiert waren oder vor dem Auslass verbliebenes Wasser enthielten.

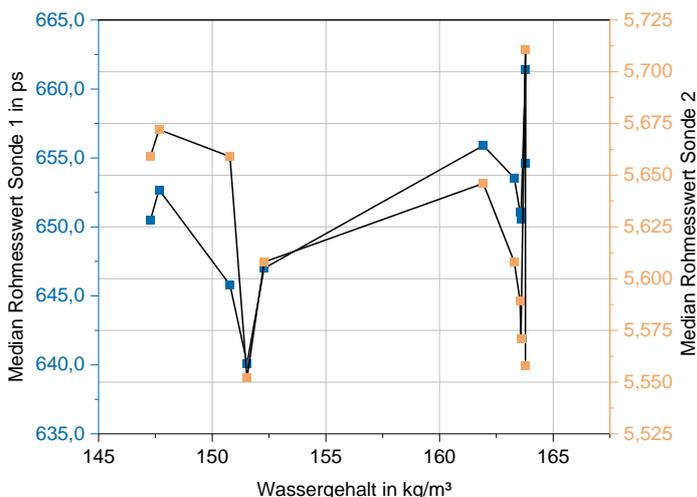


Abbildung 3.20: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1

Die Ergebnisse ließen somit zwar keine Überprüfung der Messgenauigkeit zu, zeigten aber den Optimierungsbedarf auf, der in der darauffolgenden Praxisversuchsreihe 2 eingebunden wurde.

3.3.3.2 Praxisversuchsreihe 2

Die zweite Versuchsreihe der Praxisuntersuchungen wurde in einem Transportbetonwerk durchgeführt. Es konnten sechs Proben aus zwei verschiedenen Zusammensetzungen geprüft werden. Bei der ersten Zusammensetzung handelt es sich um einen Luftporenbeton mit einem Luftgehalt von circa 5,0 Vol.-%, dem 0,25 M.-% der Zementmenge eines natürlichen Luftporenbildners und 0,70 M.-% der Zementmenge eines PCE-basierten Fließmittels zugegeben wurde. Neben einem CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N enthielt er Rundkornmaterial bis zu einem Größtkorn von 32 mm. Der zweiten Zusammensetzung wurden 1,0 M.-% der Zementmenge eines PCE-basierten Fließmittels zugegeben. Neben einem CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N enthielt er Rundkornmaterial bis zu einem Größtkorn von 16 mm sowie einen inerten Zusatzstoff Typ I.

Die Probenahme erfolgte entsprechend Abbildung 3.21 (links) nach Beladung der Fahrmischer in einer Menge, die eine Untersuchung mittels Feuchtesonden und Darrmethode und eine Bestimmung der Frischbetonrohichte und des Luftgehalts ermöglichte.



Abbildung 3.21: Probenahme im Rahmen der Praxisversuche Teil 2 (links) und Darrvorgang (rechts)

a) Versuchsreihe 2-1

Die Kalibrierkurven wurden, analog zur ersten Praxisversuchsreihe, mit den entsprechenden Materialien in nachfolgenden Laborversuchen ermittelt. Diese sind, für die erste geprüfte Zusammensetzung, in Abbildung 3.22 für beide Feuchtesonden zusammen mit den in den Praxisversuchen ermittelten Medianwerten (gekennzeichnet durch schwarzen Punkt) dargestellt. Neben den Medianwerten der Rohmesswerte sind aus den Messdaten der Kalibriermessungen zusätzlich die Minimal- und Maximalwerte der jeweils 15 Einzelmessungen dargestellt, um die Streubreite der Daten zu verdeutlichen. Eine Charge wurde dabei an zwei Proben vermessen. Da die Abweichung zwischen den Messungen so gering war, ist die Differenz der zwei dargestellten Punkte im Diagramm nicht erkennbar. Die Praxisdaten zeigen, dass die Messwerte mit den erstellten Kalibrierkurven zu bewerten sind und bei einem Soll-Wassergehalt von 153 kg/m^3 einen Wassergehalt von 166 kg/m^3 , 168 kg/m^3 (zweifach) und 169 kg/m^3 (Feuchtesonde 1) beziehungsweise 156 kg/m^3 (zweifach), 163 kg/m^3 und 169 kg/m^3 (siehe Anhang 3) ergeben. Mittels Darrverfahren

wurde an der ersten Probe ein Wassergehalt von 160 kg/m^3 ermittelt. Die beiden Maximalwerte sind der dritten Materialprobe zuzuordnen, die - trotz gleicher Zusammensetzung - eine deutlich weichere Konsistenz hatte, als die vorhergehenden beiden Proben und einen durch Darren bestimmten Wassergehalt von 176 kg/m^3 enthielt. Dies ist möglicherweise auf die Probenahme zurückzuführen und sollte deshalb bei den Messwerten unter Vorbehalt bewertet werden.

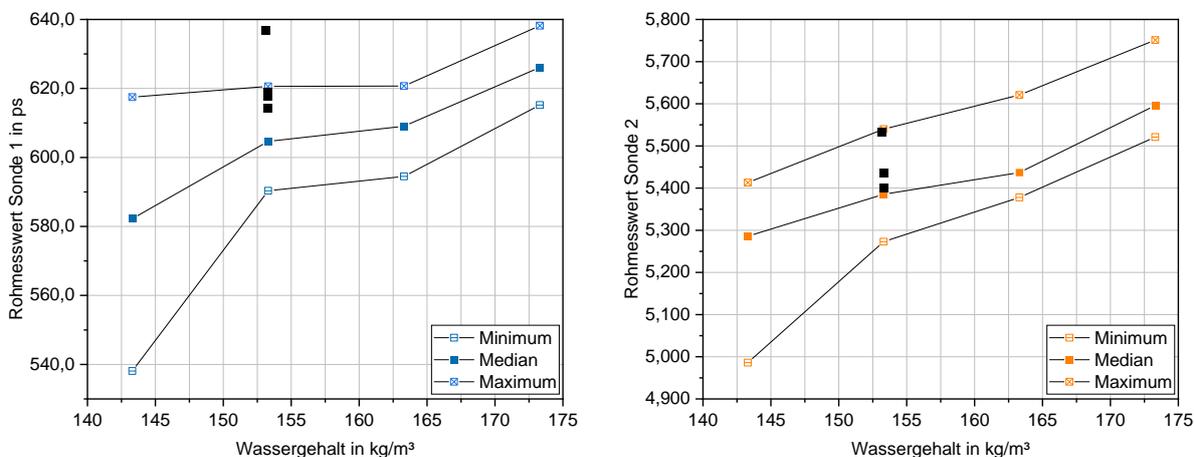


Abbildung 3.22: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der im Labor erstellten Kalibrierkurve und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 2-1

b) Versuchsreihe 2-2

Die Labor- und Praxisergebnisse der zweiten geprüften Zusammensetzung sind entsprechend der vorangegangenen Mischung in Abbildung 3.23 zusammengefasst. Ein Abgleich der Praxisdaten mit den Kalibrierkurven führt zu der Ermittlung von Wassergehalten von 172 kg/m^3 , 181 kg/m^3 und 184 kg/m^3 (Feuchtesonde 1) und 174 kg/m^3 , 179 kg/m^3 und 183 kg/m^3 bei einem geplanten Soll-Wassergehalt von 176 kg/m^3 . Dies zeigt, dass Abweichungen von maximal $4\text{-}8 \text{ kg/m}^3$ bzw. $2\text{-}7 \text{ kg/m}^3$ ermittelt werden können. Die ermittelten Darrergebnisse führen zu einem Messergebnis von 192 kg/m^3 , das deutlicher als die Feuchtemesssonden von den Soll-Werten abweicht. Diese Differenz könnte auf die Versuchsdurchführung an der Außenluft (Zugluft) zurückzuführen sein und spiegelt eines der Probleme des Messverfahrens, die Sensibilität des Verfahrens aufgrund möglichen Materialverlusts, wider.

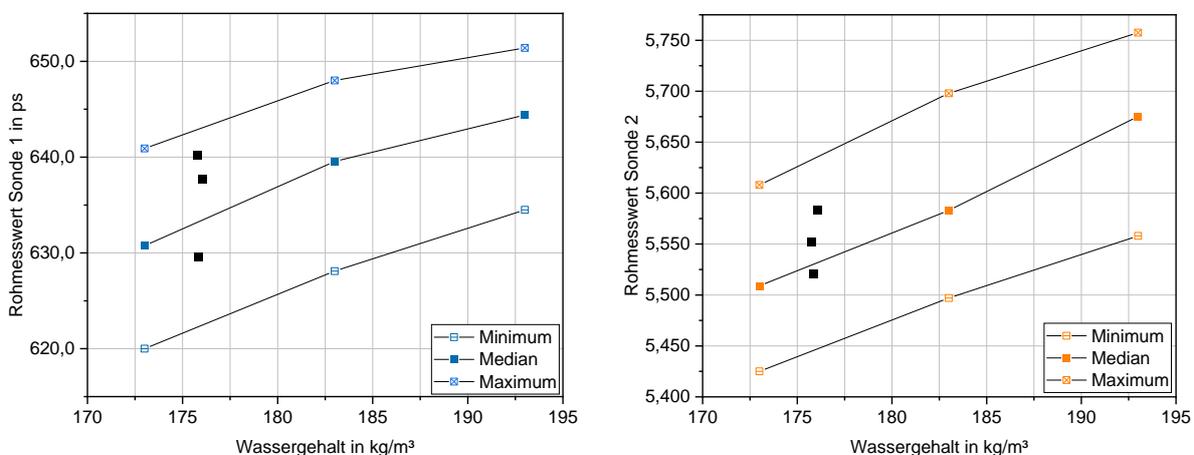


Abbildung 3.23: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der im Labor erstellten Kalibrierkurve und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 2-2

Insbesondere die zweite Versuchsreihe der Praxisuntersuchungen zeigt, dass durch konkrete Planung und Abstimmung auf das geplante Prüfverfahren unter Praxisbedingungen die Bestimmung des Wassergehalts an einer präzise kalibrierten Probe möglich ist.

Abweichungen in der Zusammensetzung oder dem Prüfverfahren (Zeitabstände) beeinflussen das Messergebnis jedoch deutlich und machen eine exakte Bestimmung unmöglich.

3.4 Arbeitspaket 5 – Empfehlung eines Prüf- und Auswertekonzepts; Verfahrensanweisung

3.4.1 Ziel

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Empfehlung eines Prüfablaufs zum Einsatz der Feuchtemess-technik.

3.4.2 Ablauf

Es werden Hinweise zum Prüfverfahren und zur Auswertung gegeben, welche aus den ermittelten Messwerten der vorherigen Arbeitspakete und der Literaturrecherche hervorgehen. Im Vordergrund steht dabei ein angepasster Verfahrensablauf für die Anwendung in der Transportbetonindustrie.

3.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse aus den Laborversuchsreihen, den Praxisuntersuchungen und den Literaturrecherchen wurden ausgewertet und in einer Verfahrensanweisung zusammengefasst. Grundsätzlich sind bei allen Messungen die Herstellerangaben der Messsonden zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Anwendung in der Transportbetonindustrie können gewisse Anpassungen jedoch zu einem optimierten Prüfverfahren führen. Im Folgenden soll ein Überblick über einen möglichen optimierten Prüfverfahren gegeben werden. Dieser umfasst eine Kurzbeschreibung des Verfahrens, eine Auflistung der erforderlichen Geräte sowie Angaben zur Durchführung der Messungen und der anschließenden Auswertung. Der Prüfverfahren bezieht sich auf die Prüfung an Frischbeton. Die erhobene Datenlage bietet keine ausreichende Grundlage für eine Verfahrensanweisung an Gesteinskörnung oder anderen Ausgangsstoffen.

Kurzbeschreibung

An einer Frischbetonprobe wird mithilfe einer mobilen Feuchtemesssonde auf Basis der Mikrowellentechnik oder der Zeitbereichsreflektometrie ein Messwert generiert und mit Hilfe einer zuvor ermittelten Kalibrierkurve der zugehörige Wassergehalt bestimmt.

Geräte

Feuchtemesssonde

Die angegebenen Empfehlungen beziehen sich auf die in den Untersuchungsserien einbezogenen Sensoren, die auf der Mikrowellentechnik oder der TRIME-TDR-Technik (Zeitbereichsreflektometrie) basieren.

Prüfbehälter

Nach dem Mischvorgang beziehungsweise nach der Probenahme ist die Probe in einen handelsüblichen Eimer aus Kunststoff einzufüllen. Dieser sollte über ein Fassungsvermögen von circa 12 l verfügen und keine Metallteile im Inneren aufweisen.

Thermometer zur Bestimmung der Probentemperatur

Zur Bestimmung der Probentemperatur ist ein handelsübliches digitales oder analoges Thermometer zu verwenden.

Verdichtungsgeräte

Im Labor- und optimalerweise auch im Praxisbetrieb erfolgt die Verdichtung der in den Kunststoffeimer eingefüllten Probe durch einen Rütteltisch. Dieser sollte so ausgelegt sein, dass sowohl die Verdichtungsdauer als auch die -intensität gesteuert werden können.

Durchführung der Messungen

Die Materialprobe ist nach dem Ende der Mischzeit in einen handelsüblichen Kunststoffeimer mit einem Fassungsvermögen von ca. 12 l einzufüllen. Die Probemenge sollte dabei circa dreiviertel des Eimervolumens betragen. Die Probe ist anschließend so weit zu verdichten, dass sie möglichst wenige Lufteinschlüsse aufweist, die zu einer inhomogenen Materialverteilung um die Sondenoberfläche während der Messung führen. Idealerweise erfolgt die Verdichtung mit Hilfe eines Rütteltisches. Steht im Praxisbetrieb kein Rütteltisch zur Verdichtung der Probe zur Verfügung, ist durch Aufklopfen des Eimers auf den Boden eine möglichst geschlossene Betonoberfläche herbeizuführen, bevor die Messung gestartet wird. Die Verdichtung soll dabei nur so lange erfolgen, dass es zu keiner Materialsedimentation oder Entmischung kommt. Ein Bluten des Betons ist ebenfalls zu vermeiden, da dies die Messung stark beeinflusst.

Die Sonde ist entsprechend der Vorgabe des Herstellers in den Frischbeton einzuführen. Anschließend kann die Messung gestartet werden und ein Einzelmesswert aufgenommen werden. Insgesamt sind 15 Einzelmessungen durchzuführen. Dabei gilt es zu beachten, dass eine Messstelle nicht mehrfach ohne Verdichtung verwendet wird.

Sollen weitere Frischbetonprüfungen wie die Frischbetonrohichte, der Luftgehalt und die Konsistenz des Betons bestimmt werden, muss dies an einer zusätzlichen Probe erfolgen.

Bestimmung des Wassergehalts

Kalibrierung / Erstellung der Kalibrierkurven

Um aus den ermittelten (Roh-)Messwerten einen der Probe zugehörigen Wassergehalt ableiten zu können, ist eine Kalibrierung notwendig. Die Erstellung der Kalibrierkurve ist an die Herstellerangaben der Messsonden und die individuell vorliegenden Randbedingungen und Einsatzzwecke der Messsonden anzupassen, weshalb für die vorliegende Verfahrensanleitung keine absoluten Angaben gemacht werden können. Die Anpassung der Kalibrierkurve bezieht sich dabei auf die Anzahl der Kalibrierpunkte, die Differenz zwischen den Kalibrierpunkten und die Kalibrierintervalle.

Für die Kalibrierpunkte gilt, dass der minimal zu erwartende und der maximal zu erwartende Wassergehalt durch die Kalibrierkurve abgebildet werden müssen. Außerdem gilt, je größer der

Abstand zwischen den beiden vordefinierten Wassergehalten (bspw. 10 kg/m³ oder 25 kg/m³), desto mehr tragen weitere Kalibrierpunkte zur Erhöhung der Präzision und zu einer besseren Abbildung des Materialverhaltens bei. Da die geplanten Abweichungen des Wassergehalts in einem Transportbetonwerk für eine Zusammensetzung meist gering ausfallen, sind Kalibrierpunkte im Abstand von 5-10 kg/m³ Wasser zu empfehlen.

Die Kalibrierintervalle sind auf die Änderungen der Ausgangsstoffe abzustimmen. Ändern sich diese grundlegend (Materialherkunft, Sieblinie, Zusammensetzung des Zementes, Zusatzmittel), ist eine erneute Kalibrierung durchzuführen, um die Genauigkeit der Messungen weiterhin gewährleisten zu können. Auch neue Lieferchargen in den Ausgangsstoffen sollten mit einer erneuten Kalibrierung einhergehen.

Zusätzlich ist die Kalibrierung auf die Zusammensetzung und den im Einzelfall zu erwartenden Prüfablauf in der Praxis abzustimmen. Dabei ist insbesondere der Prüfzeitpunkt (die Dauer zwischen Ende der Nassmischzeit und Beginn der Prüfung) an die zu erwartenden Praxisbedingungen anzupassen.

Die Erstellung der Kalibrierkurve erfolgt grundsätzlich an Frischbetonproben, mit gleichen beton-technologischen Eigenschaften und Parametern, welche unterschiedliche, bekannte und vordefinierte Wassergehalte aufweisen. Die Frischbetonproben mit unterschiedlichem Wassergehalt sind entsprechend der Angaben unter „Durchführung der Messung“ zu prüfen und in eine Kalibrierkurve zu überführen.

Messdaten und Auswertung

Grundsätzlich ist der Medianwert aus 15 Einzelmesswerten als Ergebnis der Messung anzusehen. Die ermittelten Messwerte sind zu dokumentieren und auf Normalverteilung und Ausreißer mithilfe statistischer Tests zu untersuchen. Alle Ausreißer werden verworfen und aus den verbleibenden Werten wird erneut der Medianwert gebildet. Liegen mehr als zwei Ausreißer vor ist die Messung zu verwerfen.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Möglichkeit der exakten Wassergehaltsbestimmung an Frischbeton birgt ein hohes Potential zur Kontrolle und Optimierung der Frischbetonqualität. Durch Feuchteschwankungen der Ausgangsstoffe oder Dosierabweichungen stimmen der festgelegte Soll-Wassergehalt und der tatsächliche Wassergehalt des Frischbetons nicht immer überein. In der Folge kommt es zu Veränderungen des Wasserzementwertes, der ausschlaggebend für die zu erwartenden Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons ist.

Bisher standardmäßig angewandte Prüfverfahren, wie beispielsweise das Darren, nutzen eine Trocknung und Rückwägung der Probe zur direkten Bestimmung des enthaltenen Wassergehaltes. Oftmals unterliegen die resultierenden Ergebnisse verfahrensbedingten Ungenauigkeiten, die durch Verlust von Probenmaterial, ungenauer Wägung oder den subjektiven Einschätzungen des Prüfers zum Trocknungsgrad zustande kommen können. Zusätzlich dazu stellen die lange Versuchsdauer und die fehlende Wiederholungsmöglichkeit (zerstörende Prüfverfahren) weitere Kritikpunkte dar, die den Bedarf der Entwicklung neuer Prüfverfahren zur Bestimmung des Wassergehalts an Frischbeton aufzeigen.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war die Bewertung neuer Prüfkonzeppte und -methoden für eine zielsichere Bestimmung des Wassergehaltes am Frischbeton vor dem Hintergrund einer Vergleichmäßigung der Betonqualität. Dazu wurde die Wassergehaltsbestimmung mittels indirekter Feuchtemesstechnik untersucht. Zusätzlich fanden vergleichende Messungen auf Grundlage in der Praxis angewendeter Verfahren statt. In den durchgeführten Versuchsreihen wurden zwei am Markt verfügbare, praxisrelevante Feuchtemesssonden verwendet und dabei die betontechnologischen Faktoren ermittelt, die die erzielten Messergebnisse bzw. die indirekten Messsysteme beeinflussen. Beide Geräte nutzen zur Wassergehaltsbestimmung die Permittivität als materialspezifische Kenngröße. Sie unterscheiden sich in ihrem Messprinzip dahingehend, dass einerseits das Mikrowellenverfahren und andererseits die sogenannte Zeitbereichsreflektometrie zugrunde liegt. Um einen exakten Wassergehalt abzuleiten ist dabei - wie bei allen indirekten Prüfverfahren - eine Kalibrierung notwendig. Die Versuchsreihen wurden so aufgebaut, dass zunächst eine eingehende Materialcharakterisierung durchgeführt wurde. Aus den Materialien wurde dann eine Frischbetonzusammensetzung erstellt, die im Forschungsprojekt als Referenz diente. Die Zusammensetzung wurde so entwickelt, dass sie als praxisrelevant einzustufen ist. Die Zusammensetzung wurde mithilfe der beiden Feuchtesonden geprüft, während parallel als Abgleich standardisierte Darrversuche durchgeführt wurden. Ausgehend von der Referenzzusammensetzung wurde, bei gleichbleibendem Zementgehalt, der Wassergehalt der Zusammensetzung variiert, sodass aus den ermittelten Daten eine Kalibrierung der Geräte erfolgen konnte. In weiteren Versuchsreihen wurden betontechnologische Parameter der Frischbetonzusammensetzung geändert, um die resultierenden Auswirkungen auf das Messsignal und damit den ermittelten Rohmesswert zu analysieren. Insbesondere wurden Faktoren wie der Wasserzementwert, die Frischbetonkonsistenz, der Einsatz von Zusatzmitteln oder die verwendete Gesteinskörnung betrachtet.

Innerhalb der Versuche konnte gezeigt werden, dass einige Parameter einen vernachlässigbaren bis kaum messbaren Einfluss auf die indirekten Feuchtemessverfahren haben, während andere Parameter einen messbaren Einfluss zeigten. Der Trocknungsgrad der verwendeten Gesteinskörnung konnte beispielsweise als Parameter herausgearbeitet werden, welcher die indirekte Feuchtemesstechnik nicht messbar beeinflusst. Des Weiteren beeinflusst die Materialtemperatur

der Gesteinskörnung das Messergebnis in Frischbeton nicht signifikant. Zwar besitzt die Permittivität von Wasser eine deutliche Abhängigkeit von der Temperatur, jedoch überträgt sich eine veränderte Materialtemperatur der Gesteinskörnung nicht in ausreichendem Umfang auf die Wassertemperatur und somit auch nicht auf die gemessene Permittivität.

Die Zugabe von Betonzusatzmitteln (FM, LP) führte zu einer Beeinflussung der Messergebnisse. Dies ist nicht primär auf die chemische Zusammensetzung der Zusatzmittel, sondern auf die hierdurch hervorgerufene Veränderung der Frischbetoneigenschaften zurückzuführen. Weitere Parameter, die eine deutliche Auswirkung auf das Messsignal haben, sind die Sieblinie, das Größtkorn und die Kornform der Gesteinskörnung. Überdies zeigten sich die Zementart sowie die Zementzusammensetzung als Haupteinflussfaktoren auf die Prüfergebnisse der Feuchtemesssonden. Da die Leitfähigkeit die indirekten Messmethoden beeinflusst, zeigen sich abweichende Anteile der Bestandteile von Zement oder Änderungen durch variierende Herkunft der Ausgangsstoffe besonders deutlich. Dieser Einflussfaktor zeigt sich verstärkt bei der Feuchtesonde auf Basis der Mikrowellentechnik. Zudem führte eine erhöhte Mahlfineinheit zu einer Herabsetzung des Rohmesswertes. Letztlich wirkt sich ebenfalls die Zeitspanne zwischen abgeschlossener Nassmischzeit und Prüfung mittels Feuchtemesssonde auf den ermittelten Wassergehalt der Feuchtemesssonden aus. Dieser Effekt kann auf die ablaufende Hydratation des Zementes im Frischbeton zurückgeführt werden und wird bei Verwendung von Verzögerern geschwächt.

Zusammenfassend zeigt die Auswertung der verschiedenen betontechnologischen Einflussparameter, dass häufig eine deutlich messbare Beeinflussung im Hinblick auf die indirekten Feuchtemesstechnologien vorliegt. Insbesondere die folgenden Parameter nahmen Einfluss auf die Ergebnisse der Feuchtemessungen:

- Gesteinskörnung
 - o Kornform
 - o Größtkorn
 - o Sieblinie
- Zement
 - o Zementart (CEM I, CEM II, ...)
 - o Zementgehalt
 - o Bestandteile wie Hüttensand und Kalksteinmehl
 - o Mahlfineinheit des Zementes
- Einsatz von Zusatzmittel
 - o Fließmittel
 - o Luftporenbildner
- Änderung der Konsistenz

Auf Grundlage der Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes lässt sich allgemein festhalten, dass die hier betrachtete Feuchtemesstechnik auf eine Vielzahl betontechnologischer Variationsparameter reagiert - deren Einfluss jedoch noch nicht abschließend beurteilt werden kann. Abgeleitet werden kann, dass eine Neukalibrierung bei Änderung der Betonzusammensetzung in jedem Fall anzustreben ist. Bei einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem Rohwert der Messung führt eine Erhöhung der Kalibrierpunkte zu einer präziseren Anpassung der Kurve und somit einer erhöhten Genauigkeit der Messung. Die Anzahl der Kalibrierpunkte sollte in der Praxis an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Empfehlenswert ist zudem die Festlegung eines einheitlichen Prüfzeitpunktes, sowohl für die Erstellung der Kalibrierpunkte als auch für die späteren Feldmessungen.

Wie bei standardisierten Prüfverfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes von Frischbeton unterliegen auch die Feuchtemessungen mithilfe der untersuchten Feuchtemesssonden Messschwankungen. Der Vorteil der untersuchten Feuchtemesstechnik liegt insbesondere in der kurzen Prüfdauer sowie der Möglichkeit zu Wiederholungsmessungen. Ihr Einsatz stellt somit ein Werkzeug zur schnellen Wassergehaltsbestimmung an Frischbeton dar und bietet neben standardisierten Prüfverfahren eine Zusatzoption zur Kontrolle und Anpassung des Wassergehaltes. Auf Grundlage der in diesem Forschungsprojekt aufgenommenen Messwerte zeigte sich, dass die Sensibilität gegenüber einer Veränderung verschiedener betontechnologischer Parameter allerdings stets beachtet werden sollte. Für eine möglichst hohe Genauigkeit der Wassergehaltsbestimmung mithilfe der untersuchten Feuchtemesstechnik sollte eine Anpassung der zu untersuchenden Betonzusammensetzung mit einer Anpassung der Kalibrierkurve einhergehen. In diesem Zusammenhang ist der Einsatz der Feuchtemesstechnik insbesondere bei Anwendungsfällen hilfreich in denen die Veränderung der Ausgangsstoffe begrenzt ist. Dadurch entsteht ein vergleichsweise geringer Kalibrieraufwand. Beispiele dafür sind Transportbetonwerke oder Fertigteilewerke, welche wiederkehrend gleiche Betonzusammensetzungen herstellen.

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Transportbetonhersteller gleichen mögliche Schwankungen im Wassergehalt, die durch Abweichungen in den Feuchtegehalten der Ausgangsstoffe oder unvermeidbare Dosierungenauigkeiten entstehen und damit die erzielte Festigkeit des Betons beeinflussen, durch Sicherheitspuffer in Form eines Vorhaltemaßes aus. Dieses Vorhaltemaß kann durch eine Erhöhung des Zementgehalts sichergestellt werden, wodurch ein Mehrbedarf an Rohstoffen und eine Steigerung des Preises entsteht. Kann der Wassergehalt einer Betonzusammensetzung jedoch nach Herstellung präzise und innerhalb kürzester Zeit bestimmt werden, könnte dieses Vorhaltemaß reduziert und die genannten Nachteile damit ausgeräumt werden. Insbesondere würde der Mehrwert einer schnellen und präzisen Wassergehaltsbestimmung am Frischbeton zu einer Steigerung und Vergleichmäßigung der Frischbetonqualität und dementsprechend auch den Festbetoneigenschaften führen.

Durch die erzielten Ergebnisse können KMU die Anwendung von Feuchtemesstechnik besser an ihren Anwendungsfall anpassen, wodurch die Produktions- und Kontrollprozesse optimiert werden können. Die erarbeitete Verfahrensanweisung gibt Informationen zur Verwendung der untersuchten Feuchtemesstechnik. Übernehmen KMU die gewonnenen Erkenntnisse in ihre Prüfpraxis kann der Einsatz der Messtechnik eine Erleichterung bei der Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Betonqualität liefern. Im Falle einer großen Bandbreite der in einem Werk verwendeten Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen erfordert dies allerdings einen entsprechenden hohen Aufwand für die Kalibrierung. Auch Änderungen in den Materialeigenschaften sollten zur Sicherstellung einer hohen Aussagequalität mit einer Anpassung der Kalibrierung einhergehen. Aus diesem Grund ist die Messtechnik in Transportbetonwerken hauptsächlich bei der Wassergehaltsbestimmung wiederkehrend eingesetzter Betonzusammensetzungen mit gleichen Ausgangsstoffen von Vorteil, da in diesen Fällen der Aufwand für eine Kalibrierung in einem ausgewogenen Verhältnis zu dem daraus zu erwartenden Nutzen steht. Bei wiederkehrend gleichen Betonzusammensetzung mit gleichen Ausgangsstoffen ist eine ständige Neukalibrierung nicht zwangsweise notwendig. Aus diesem Grund erscheint die Messtechnik vor allem auch für die Anwendung in Fertigteilwerken als gut geeignet.

6 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Tabelle 6.1

Art der Zuwendung		
Wissenschaftlich-technisches Personal	2020	4,2
	2021	2,0
	2022	10,0
	2023	13,0
	Summe	29,2
Geräte	3.379,60 €	(mobiles Messgerät)
Leistungen Dritter	keine	

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die beschriebenen, innerhalb der Projektlaufzeit geleisteten Arbeiten entsprechen dem Arbeitsdiagramm und waren für die Durchführung des Projekts erforderlich und angemessen. Die durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet und dienten der Beantwortung der Fragestellungen. Für ein zielorientiertes Arbeiten war das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal notwendig.

Aufgrund des pandemiebedingten eingeschränkten Universitätsbetriebs an der Technischen Universität Kaiserslautern (die zum 01.01.2023 zur Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau wurde) und Lieferverzögerungen einer Feuchtesonde, kam es zu Verzögerungen im Start der Versuchsreihen. Zeitverzögert konnte der Versuchsbetrieb jedoch aufgenommen und die Geräte geliefert werden, sodass die Arbeiten dann innerhalb der verlängerten Projektlaufzeit durchgeführt und abgeschlossen werden konnten.

8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der Projektziele und Festlegung der Zusammensetzung des Referenzbetons und weiterer erster Arbeitsschritte	Online-Meeting zu Beginn der Festlegung der Betonzusammensetzungen	09.12.2020
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der bisherigen Untersuchungsergebnisse, Festlegung einer neuen Zusammensetzung des Referenzbetons sowie der folgenden Arbeitsschritte	Online-Meeting nach erster Versuchsreihe	20.09.2021
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der bisherigen Untersuchungsergebnisse, Festlegung der zu untersuchenden Einflussfaktoren (Zementart)(in eingeschränkter Teilnehmerzahl)	Online-Meeting zur Festlegung der weiteren Untersuchungsparameter	15.03.2022
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der bisherigen Untersuchungsergebnisse, Festlegung der zu untersuchenden Einflussfaktoren (Zementart)	Online-Meeting zur Festlegung der weiteren Untersuchungsparameter	09.05.2022
Transfer der Ergebnisse	Präsentation und Diskussion der Ergebnisse	Vortrag im Rahmen der Fachtagung Praxis Transportbeton, Berlin	15.09.2022
Veröffentlichung	Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse	Veröffentlichung in der Zeitschrift beton, Bau+Technik Verlag	September 2022
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der Ergebnisse zum Einfluss der Zementart und Abstimmung des weiteren Vorgehens	Online-Meeting	02.11.2022

Transfer der Ergebnisse	Präsentation und Diskussion der Ergebnisse	Vortrag im Rahmen der VDB e. V. Regionalfachtagung, Göllheim	14.11.2022
Veröffentlichung	Bericht zum Projekt	Jahresbericht des Konstruktiven Ingenieurbaus des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern	2022
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der Ergebnisse zur ersten Praxisversuchsreihe und Abstimmung des weiteren Vorgehens	Online-Meeting	20.06.2023
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung der Projektergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens bezüglich des Projektabschlusses und des Abschlussberichtes	Sitzung an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau, Kaiserslautern	13.12.2023

- Geplante Transfermaßnahmen:

An den im Antrag dargestellten Maßnahmen zum Ergebnistransfer haben sich keine Änderungen ergeben, sodass diese Tabellen weiterhin Bestand haben. In den nachfolgend dargestellten Tabellen sind die geplanten Maßnahmen erneut im Detail dargestellt und um die Zeitangaben aktualisierend ergänzt worden.

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse	Treffen zu Beginn und am Ende eines neuen Arbeitsschrittes	2 x jährlich
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Präsentation und Diskussion der Ergebnisse bereits während der Laufzeit durch Experten im Rahmen von regelsetzenden Gremien	Sitzungen von Gremien und Normausschüssen	laufend
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch FTB	Ergebnistransfer in die Industrie	BTB-Jahresbericht, BTB-Homepage, Erstellen von Anwendungshilfen und -empfehlungen	laufend

Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an die Studierenden der Fachrichtung Bauingenieurwesen	Lehre an der TU Kaiserslautern, Vorlesungen, Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten, Gastvorlesungen	laufend
--	---	---	---------

Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens			
Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	voraussichtlicher Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung und Diskussion des erstellten Schlussberichts	Online-Meeting	11.03.2024
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Industrie und wissenschaftliche Publikation (zweisprachig deutsch/englisch)	Abschlussbericht, Fachzeitschriften (z. B. <i>Beton</i> , Verlag Bau+Technik; <i>Bauingenieur</i> , Springer-VDI-Verlag; <i>BFT International Betonwerk+Fertigteil-Technik</i> , Bauverlag)	Juli 2024
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Berücksichtigung der Ergebnisse bei der Überarbeitung von Normen und Richtlinien	Sitzungen von Gremien bzw. Normausschüssen	laufend
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an die Studierenden der Fachrichtung Bauingenieurwesen, Vermittlung der Ergebnisse im Rahmen der beruflichen Weiterbildung für Bauingenieure und Werkleiter	Lehre an der RPTU Kaiserslautern: Vorlesungen, Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten; Gastvorlesungen Vorträge auf Fachtagungen z. B. Weiterbildung für Tragwerksplaner an der RPTU Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit der Ingenieurkammer Rheinland-Pfalz, Weiterbildung für Prüfstellen- und Werkleiter des BÜV Hessen - Rheinland-Pfalz	

Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch FTB	Ergebnistransfer in die Industrie	BTB-Jahresbericht, BTB-Homepage, Erstellen von Anwendungshilfen und -empfehlungen, BTB-Praxistipp	
--	-----------------------------------	---	--

Literatur

- [1] Wischers, G.; Hallauer, O. (1967) *Einfluss und Bestimmung der Eigenfeuchte von Beton-zuschlagstoffen* in: Verein Deutscher Zementwerke [Hrsg.] *Betontechnische Berichte 1966*. Düsseldorf: Betonverlag, S. 89–113.
- [2] Abrams, D. A. (1919) *Design of Concrete Mixtures*. Chicago: Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.
- [3] DIN EN 206:2021-06, Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [4] Verein Deutscher Zementwerke (2008) *Zement-Taschenbuch*. 51. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik.
- [5] Backe, H.; Hiese, W.; Möhring, R. (2009) *Baustoffkunde für Ausbildung und Praxis*. 11. Aufl. Neuwied: Werner.
- [6] Powers, T. C. (1958) *Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste* in: *Journal of the American Ceramic Society* 41, H. 1, S. 1–6. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x>
- [7] Stark, J.; Wicht, B. (2001) *Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff ; mit 42 Tabellen*. Basel: Birkhäuser.
- [8] Walz, K. (1970) *Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit* in: *Beton*, H. 11, S. 165–178.
- [9] Scheidt, J. C. (2019) *Ermittlung Gesamtwasser für R-Beton mit definiertem Wasserzementwert* [Dissertation]. Technische Universität Kaiserslautern.
- [10] Hanke, V.; Siebel, E. (1995) *Erweiterte Grundlagen für die Betonzusammensetzung* in: *Beton*, H. 6.
- [11] Mouhasseb, H. (2007) *Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens* [Dissertation]. Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- [12] *DBV (2014) Merkblatt Frischbetonprüfungen*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.
- [13] DIN EN 1048-1:1972-01, Prüfverfahren für Beton - Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper. Berlin: Beuth Verlag.
- [14] ONR 23303 Prüfverfahren Beton (PVB) Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seine Ausgangsstoffe. Wien.
- [15] NEN 5960:2006-07, Beton - Bepaling van de water-cementfactor/water-bindemiddelfactor van betonspecie. Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.
- [16] Leschnik, W. (1999) *Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und Moderne*.

- [17] Kupfer, K. (1997) *Moderne Verfahren zur Materialfeuchtemessung* in: teme 64, JG, S. 419–421. <https://doi.org/10.1524/teme.1997.64.jg.419>
- [18] Nägele, E. W.; Hilsdorf, H. K. (1980) *Die Frischbetonanalyse auf der Baustelle* in: Beton 30, H. 4, S. 133–138.
- [19] Krell, J. [Hrsg.] (2015) *Schnelle Wassergehaltsbestimmung am Frischbeton mittels Eintauchsonde-BWI*.
- [20] Kruschwitz, S. (2014) *Feuchtemessung im Bauwesen - ein Überblick*. <https://www.ndt.net/article/bau-zfp2014/papers/vortrag%205.pdf>.
- [21] Chen, W.; Shen, P.; Shui, Z. (2012) *Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement* in: Construction and Building Materials 34, S. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.073>
- [22] Dollase, A. (2019) *Mikrowellenverfahren zur Untersuchung des Erhärtungs- und Trocknungsverhaltens von zementgebundenen Baustoffen* [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal. <https://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fbd/bauingenieurwesen/diss2019/dollase/dd1912.pdf> [Zugriff am: 9. Nov. 2023].
- [23] Lindner, H. (1999) *Physik für Ingenieure – Mit zahlreichen Tabellen und Beispielen*. 15. Aufl. München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.
- [24] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A. (2007) *Physik für Ingenieure*. 11. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [25] Kupfer, K. (1991) *Feuchtemessung an Zuschlagstoffen für die Betonherstellung unter Verwendung der Mikrowellenmeßtechnik*. Weimar: Hochsch. f. Architektur u. Bauwesen.
- [26] Stacheder, M. (1995) *Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport* [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie.
- [27] Figura, L. (2021) *Lebensmittelphysik – Physikalische Kenngrößen - Messung und Anwendung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [28] IMKO Micromodultechnik GmbH (2017) *Allgemeine Anforderungen an Kapazitive-, Mikrowellen- und TDR- Sensoren zur präzisen Materialfeuchtemessung*.
- [29] Klaas, K. (2005) *Vor- und Nachteile elektronischer Messverfahren* in: BFT Betonwerk + Fertigteil-Technik, H. 12, S. 34–41.
- [30] Kormann, G. (2001) *Untersuchungen zur Integration kontinuierlich arbeitender Feuchtemeßsysteme in ausgewählte Futtererntemaschinen* [Dissertation]. TU München. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/820167/document.pdf> [Zugriff am: 9. Nov. 2023].
- [31] Nilsson, L.-O. [Hrsg.] (2018) *Methods of measuring moisture in building materials and structures – State-Of-the-Art report of the RILEM Technical Committee 248-MMB*. Cham: Springer.

- [32] Phillipson, M. C. et al. (2007) *Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches* in: Building Services Engineering Research and Technology 28, H. 4, S. 303–316. <https://doi.org/10.1177/0143624407084184>
- [33] Černý, R. (2009) Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review in: Measurement 42, H. 3, S. 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.08.011>
- [34] Wernecke, R. (2005) Industrielle Feuchtemessung – Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen. Weinheim: Wiley-VCH.
- [35] IMKO Micromodultechnik GmbH (2016) Theorie der Material- und Bodenfeuchtemessung mit der TRIME-Methode.
- [36] Dettmann, U.; Bechtold, M. (2018) *Evaluating Commercial Moisture Probes in Reference Solutions Covering Mineral to Peat Soil Conditions* in: Vadose Zone Journal 17, H. 1, S. 1–6. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.12.0208>
- [37] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (2018) *Neue Perspektiven - Jahresbericht 2018*.
- [38] DIN EN 1097-6:2022-05, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen- Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2022. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [39] DIN EN 933-4:2015-01, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform- Kornformkennzahl; Deutsche Fassung EN 933-4:2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [40] DIN EN 933-3:2012-04, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen- Teil 3: Bestimmung der Kornform-Plattigkeitskennzahl; Deutsche Fassung EN 933-3:2012. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [41] DIN EN 933-1:2012-03, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung- Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [42] DIN EN 933-2:2020-09, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Analysensiebe, Nennweite der Sieböffnungen; Deutsche Fassung EN 933-2:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [43] DIN EN 196-6:2019-03, Prüfverfahren für Zement- Teil 6: Bestimmung der Mahlfineinheit; Deutsche Fassung EN 196-6:2018. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [44] DIN EN 196-1:2016-11, Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2016. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [45] DIN EN 196-3:2017-03, Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:2016. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [46] DIN EN 12350-6:2019-09, Prüfung von Frischbeton- Teil 6: Frischbetonrohddichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [47] DIN EN 12350-7:2022-05, Prüfung von Frischbeton- Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2019 + AC:2022. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [48] DIN EN 12350-5:2019-09, Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 2350-5:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [49] DIN EN 12390-3:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [50] DIN EN 12390-2:2019-10, Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Projektaufbau.....	9
Abbildung 5.1: Einfluss des Wasserzementwertes auf die Hydratation (links) Zusammensetzung des Zementsteinvolumens in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (rechts) [4].....	11
Abbildung 5.2: Betondruckfestigkeit f_{D28} zu Zement-Normdruckfestigkeit N_{28} in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach [8].....	12
Abbildung 5.3: Bestimmung des Wassergehalts einer Frischbeton mittels darverfahren über einem Gasbrenner.....	13
Abbildung 5.4: Geladener Kondensator; a) ohne Dielektrikum; b) mit Dielektrikum [24].....	16
Abbildung 5.5: Verlauf der komplexen relativen Permittivität über einen weiten Frequenzbereich [28].....	17
Abbildung 5.6: Unterscheidung verschiedener Feuchtemessverfahren auf Grundlage der Mikrowellentechnik [30].....	18
Abbildung 5.7: Impulsmessung nach dem herkömmlichen TDR-Verfahren [35].....	20
Abbildung 5.8: TDR-Impulsmessung nach dem TRIME-Verfahren [35].....	20
Abbildung 6.1: Problematik der Zusammensetzung des Referenzbetons 1; direkt nach Mischende (links); nach Messung Feuchtesonde 1 (Mitte) und nach erneuter Verdichtung, vor Messung Feuchtesonde 2 (rechts).....	23
Abbildung 6.2: Darstellung des Einflusses des Prüfzeitpunkts auf das Medianmessergebnis von Feuchtesonde 1.....	28
Abbildung 6.3: 3-Punkt- Kalibrierkurven der Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der Zusammensetzung des Referenzbetons.....	29
Abbildung 6.4: 3-Punkt- und 5-Punkt Kalibrierkurven der Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der Zusammensetzung des Referenzbetons.....	30
Abbildung 6.5: 5-Punkt Kalibrierkurve der Feuchtesonde 1 (links) und zugehörige Boxplot-Diagramme der fünf Messungen (rechts).....	33
Abbildung 6.6: 5-Punkt Kalibrierkurve der Feuchtesonde 2 (links) und zugehörige Boxplot-Diagramme der fünf Messungen (rechts).....	33
Abbildung 6.7: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 nach zehnfacher Messung einer Zusammensetzung.....	34
Abbildung 6.8: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Sand 0/2.....	36
Abbildung 6.9: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 2/8.....	36
Abbildung 6.10: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 8/16.....	37
Abbildung 6.11 Rohmessergebnis der Feuchtemesssonden in Abhängigkeit von der Probertemperatur in Leitungswasser (links) und teilwassergesättigtem Sand (10 %) (rechts)..	38
Abbildung 6.12: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Hüttensandanteil.....	40
Abbildung 6.13: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Kalksteinmehlsandanteil.....	41
Abbildung 6.14: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit vom Hüttensand- und Kalksteinmehlsandanteil.....	41
Abbildung 6.15: Darstellung des Einflusses der Konzentration von Calcium-, Kalium- und Natriumhydroxid auf das Medianmessergebnis von Feuchtesonde 2.....	43

Abbildung 6.16: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 in Abhängigkeit von der Luftporenbildnerzugabemenge	44
Abbildung 6.17: Betonage der Sohle der Innenschale des Tunnels und Frischbetonprobe 1....	46
Abbildung 6.18: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 der im Labor erstellten Kalibrierkurve (links) und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1 (rechts)	46
Abbildung 6.19: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 2 der im Labor erstellten Kalibrierkurve (links) und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1 (rechts)	47
Abbildung 6.20: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 1	47
Abbildung 6.21: Probenahme im Rahmen der Praxisversuche Teil 2 (links) und Darrvorgang (rechts).....	48
Abbildung 6.22: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der im Labor erstellten Kalibrierkurve und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 2-1	49
Abbildung 6.23: Darstellung der Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (links) und Feuchtesonde 2 (rechts) der im Labor erstellten Kalibrierkurve und der Ergebnisse der Praxisversuche Teil 2-2.....	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1: Präzisionsdaten verschiedener Prüfreihe – Feuchtesonde 1	31
Tabelle 6.2: Präzisionsdaten verschiedener Prüfreihe – Feuchtesonde 2	32
Tabelle 6.3: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Sand 0/2	35
Tabelle 6.4: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 2/8.....	35
Tabelle 6.5: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 (in ps) und Feuchtesonde 2 (-) bei der Messung von teilwassergesättigtem Kies 8/16.....	35
Tabelle 6.6: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von Kies (Größtkorn 16 mm), Kies (Größtkorn 8 mm) und Splitt (22 mm)	39
Tabelle 6.7: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von CEM II/B-S 42,5 N, CEM I 42,5 N, CEM II/B 42,5 N-LH/HS/NA.....	40
Tabelle 6.8: Medianwerte der Rohmessergebnisse von Feuchtesonde 1 und Feuchtesonde 2 bei der Messung von CEM II/A-LL 42,5 N, CEM II/B-S 42,5 N und CEM I 42,5 R	42
Tabelle 9.1	57

Anhang

Anhang 1: Übersicht über die Veränderung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit von der Messanzahl Feuchtesonde
2

Mikrowelle	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	Median	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	Median	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Referenz 1	16	6,137	0,097	0,0157	6,145	10	6,098	0,082	0,0135	6,115	5	6,075	0,091	0,0149
Referenz 2	15	6,038	0,107	0,0177	6,042	10	6,018	0,119	0,0197	6,020	5	5,960	0,115	0,0193
Referenz 3	17	6,113	0,110	0,0180	6,130	10	6,079	0,121	0,0199	6,100	5	6,049	0,093	0,0153
Referenz 4	16	6,049	0,087	0,0143	6,042	10	6,003	0,067	0,0111	6,020	5	6,002	0,094	0,0156
Referenz 5	17	6,077	0,076	0,0125	6,056	10	6,025	0,038	0,0063	6,020	5	6,022	0,033	0,0055
Referenz 6	17	6,060	0,086	0,0141	6,042	10	6,013	0,052	0,0087	6,020	5	5,990	0,062	0,0104
Referenz 7	18	6,024	0,086	0,0143	6,035	10	5,968	0,070	0,0117	5,978	5	5,942	0,036	0,0060
Referenz 8	16	6,123	0,070	0,0115	6,123	10	6,087	0,052	0,0086	6,093	5	6,042	0,023	0,0038
Referenz 9	17	6,070	0,088	0,0144	6,056	10	6,020	0,056	0,0092	6,013	5	5,981	0,034	0,0057
Referenz 10	15	6,055	0,082	0,0136	6,085	10	6,025	0,094	0,0156	6,056	5	5,950	0,072	0,0121

TRIME-TDR	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianzkoeffizient	Median	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianzkoeffizient	Median	N	Mittelwert	Standardabweichung	Varianzkoeffizient	Median
Referenz 1	15	616,3	5,7	0,0092	617,8	10	617,1	5,6	0,0091	618,0	5	617,3	6,5	0,0105	619,7
Referenz 2	18	615,2	11,0	0,0180	613,0	10	613,4	10,4	0,0170	610,2	5	611,0	8,5	0,0139	609,5
Referenz 3	17	615,5	6,8	0,0110	616,1	10	615,7	7,4	0,0120	618,3	5	620,1	1,8	0,0029	620,3
Referenz 4	16	622,9	8,0	0,0128	623,9	10	623,6	5,7	0,0092	623,9	5	627,6	4,6	0,0073	625,3
Referenz 5	17	620,8	11,0	0,0178	622,1	10	621,0	10,8	0,0174	621,3	5	619,7	11,7	0,0188	620,2
Referenz 6	17	616,2	9,7	0,0157	616,1	10	617,6	11,3	0,0182	617,1	5	624,5	7,8	0,0125	624,3
Referenz 7	18	619,9	11,7	0,0189	615,3	10	620,4	14,0	0,0225	614,7	5	623,8	18,1	0,0291	623,3
Referenz 8	16	622,5	5,4	0,0086	623,7	10	621,5	6,1	0,0099	621,6	5	619,0	7,3	0,0117	620,6
Referenz 9	15	635,3	8,2	0,0129	636,1	10	637,6	7,3	0,0115	637,9	5	637,8	10,1	0,0158	638,6
Referenz 10	16	620,6	9,4	0,0152	620,2	10	620,4	9,6	0,0155	620,2	5	621,8	10,6	0,0171	622,5

Anhang 3: Übersicht über die Messergebnisse der Praxisversuche 2-1 (1, 1-2, 2 und 3) und 2-2 (4,5 und 6) der Feuchtesonden 1 und 2

Praxisversuche 2	Messsonde 2										Messsonde 1					
	1	1-2	2	3	4	5	6	1	1-2	2	3	4	5	6		
1	5,449	5,343	5,331	5,497	5,461	5,558	5,389	611,7	600,9	617,6	636,6	623,6	643,9	640,1		
2	5,343	5,331	5,343	5,485	5,621	5,521	5,546	617,3	619,8	613,1	632	645,7	621,4	618,7		
3	5,297	5,354	5,354	5,558	5,546	5,546	5,546	627,7	618,8	625,5	631,4	649,3	629,6	650,3		
4	5,425	5,437	5,413	5,521	5,583	5,497	5,558	626,5	609,4	617,7	638	636,6	648,9	642,9		
5	5,473	5,497	5,331	5,509	5,558	5,546	5,534	612,9	610,7	601,9	633,6	629,2	619	630,2		
6	5,32	5,274	5,449	5,534	5,521	5,473	5,197	619,8	614,3	632,8	633,7	649,5	641,8	629,4		
7	5,449	5,437	5,343	5,509	5,571	5,485	5,672	606,5	608,7	616,4	632,9	632,5	637,6	641,8		
8	5,485	5,413	5,497	5,583	5,497	5,672	5,449	611,1	625	604,4	632,5	648,9	627,8	640,3		
9	5,413	5,401	5,449	5,546	5,608	5,378	5,608	629,9	609	630	638,8	652,9	634,1	643		
10	5,437	5,401	5,401	5,437	5,583	5,331	5,583	630,8	614,5	629,2	643,1	634	643,1	639,7		
11	5,449	5,401	5,263	5,571	5,621	5,558	5,621	624,4	627,9	612,8	653,7	626,7	628,9	652		
12	5,449	5,398	5,473	5,583	5,646	5,546	5,485	601	606,9	606,9	638,2	657,6	614,5	641,9		
13	5,241		5,425	5,509	5,596	5,449	5,621	618,1	604,8	641,3	641,3	618,5	629,5	622,7		
14	5,378		5,378	5,546	5,672	5,473	5,672	618,2		631,7	639,1	630,6	634,6	639,1		
15	5,546		5,449	5,546	5,546	5,646	5,509	625,7	620,9	620,9	643,3	638,7	634,7	656,5		
16			5,389	5,596	5,672	5,449	5,485	640,9		638,5	637,1	641,7	623,8	662,5		
17			5,461	5,437	5,558	5,621	5,558			620,3	632,3	635,1	625,5	626,4		
18					5,634							643,4		620,5		
Median	5,437	5,401	5,401	5,534	5,583	5,509	5,546	619	614,3	617,7	637,1	636,6	629,6	640,3		
Standardabweichung	0,08021352	0,058201	0,06315358	0,04672408	0,05787702	0,08707545	0,11447431	10,1993443	7,91016607	11,0162313	6,50620179	11,0707385	9,45713238	11,725566		
Anzahl	15	12	17	17	18	17	17	16	11	17	17	17	17	17		
Wassergehalt Soll [kg/m³]	153,3	153,3	153,3	153,14	176,07	175,86	175,76	153,3	153,3	153,3	153,14	176,07	175,86	175,76		
Rohdichte [kg/dm³]	2,1592	2,2654	2,2654	2,2368	2,3648	2,3726	2,364	2,1592	2,2654	2,2654	2,2368	2,3648	2,3726	2,364		
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,7	5,6	5,6	6,0	0,8	0,6	1,0	5,7	5,6	5,6	6,0	0,8	0,6	1,0		