

**Mikrowellenverfahren zur Untersuchung des
Erhärtungs- und Trocknungsverhaltens von
zementgebundenen Baustoffen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
Dr.-Ing.

in der
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der
Bergischen Universität Wuppertal
- Abteilung Bauingenieurwesen -

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) André Dollase, M. Sc.
aus Kahnsdorf

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders
Prof. Dr.-Ing. Lutz Nietner

Tag der Einreichung: 15.03.2019
Tag der mündlichen Prüfung: 01.10.2019

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20200812-095114-7

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20200812-095114-7>]

DOI: 10.25926/4hvk-0729

[<https://doi.org/10.25926/4hvk-0729>]

Meiner Familie
gewidmet.

Kurzfassung

Die zerstörungsfreie Mikrowellenmesstechnik eignet sich aufgrund der hohen Sensitivität gegenüber Wassermolekülen in besonderer Weise zur Detektion verschiedener Wasseranteilen in zementgebundenen Baustoffen. Durch experimentelle Untersuchungen konnten Zusammenhänge von Messgrößen der Mikrowellentechnik einerseits mit der Druckfestigkeit von Beton und andererseits mit dem Feuchtegehalt von Zementestrich nachgewiesen werden. Für beide Untersuchungsgegenstände wurde ein Messverfahren entwickelt, mit dessen Hilfe Berechnungsmodelle aufgestellt und die jeweilige Messgröße (Druckfestigkeit oder Feuchtegehalt) aus den Messwerten der Mikrowellentechnik berechnet werden können.

Bei der Untersuchung des Erhärtungsprozesses und somit der Erarbeitung von Zusammenhängen der Mikrowellenmesswerte mit der Druckfestigkeit von Beton, wurden unterschiedliche Mikrowellensensoren verwendet und zur Auswertung der Messdaten verschiedene Datenanalyseverfahren angewandt. Ziel war es, eine adäquate Kombination aus Sensor und Analyseverfahren zu erarbeiten. Aus dieser Kombination erfolgte die Aufstellung von Berechnungsmodellen zur Bestimmung der Druckfestigkeit aus den Messwerten der Mikrowellentechnik.

Die Betrachtung der Zusammenhänge von Feuchtegehalten mit den Messwerten der Mikrowellentechnik und somit der Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung, konnte Einflüsse der Wasserbindungsprozesse aufzeigen, welche in die Entwicklung des Berechnungsmodells zur Bestimmung des Feuchtegehaltes (Bezug CM-Feuchte) von Zementestrich einfließen.

Abstract

The non-invasive microwave technology is particularly suited to detect different water contents in cement-based materials. This may be attributed to their sensitivity by measuring water molecules in such materials. Experimental studies could show, that there is a relation between the microwave signals and the compressive strength of concrete and also between the microwave signals and the moisture content of a cement-based screed. For both, a measuring procedure are developed, which allows to create a calibration model to determine the wanted value (compressive strength or water content).

By the investigation of the hydration process, with the compressive strength as reference value, different microwave sensors where applied and special data analysis were used. From this proceed, the suitable combination of sensor and data analysis are chosen.

The observation of relations between moisture content and the microwave signals, and so the investigation of the processes of hydration and evaporation shows, that there are influences from the bonding of water molecules in cement-based materials. These factors where include in the created calculation model.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2014 bis 2019 als Ergebnis von mehreren Forschungsprojekten an der HTWK-Leipzig, welche sich durchgängig mit der Anwendung der Mikrowellentechnik im Bauwesen beschäftigten. Ich bin allen Kolleginnen und Kollegen sowie den Praktikanten und Studenten, deren Abschlussarbeit ich betreue durfte, zu Dank verpflichtet. Insbesondere danke ich Herrn Felix Glück, Frau Caterina Ulbricht, Herrn Hans-Peter Kühl und Frau Lisa Schneider für den fachlichen Austausch und die versuchstechnische Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders danke ich ausdrücklich für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen für diese Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Nietner danke ich im Besonderen für die fachliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Bei Prof. Dr.-Ing. Ulrich Möller möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit und der stetigen Unterstützung während der Erstellung bedanken.

Mein Dank gilt auch der Firma hf-sensor GmbH, für die Bereitstellung der Mikrowellentechnik sowie der programmiertechnischen Unterstützung bei der Analyse der Messdaten.

Zuletzt danke ich meinen lieben Eltern und meiner Familie, die mich stets unterstützt und mir Mut zugesprochen haben, diesen Weg einzuschlagen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Zielstellung der Arbeit	1
1.2 Vorgehensweise	2
2 Stand des Wissens	5
2.1 Grundlagen der Mikrowellentechnik	5
2.1.1 Theoretische Beschreibung der Polarisierbarkeit	6
2.1.2 Funktionsweise der Mikrowellenmesstechnik	7
2.1.3 Aufbauten und Eigenschaften der Sensoren	9
2.2 Erhärtung zementgebundener Baustoffe	12
2.2.1 Grundlagenbetrachtung	12
2.2.2 Funktionelle Beschreibung des Erhärtungsprozesses	17
2.2.3 Stand der Forschung zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses mittels Mikrowellentechnik	18
2.3 Feuchte in erhärteten zementgebundenen Baustoffen	23
2.3.1 Grundlagenbetrachtung	23
2.3.2 Belegreife von Estrichen	25
2.3.3 Einfluss der Wasserbindung in zementgebundenen Baustoffen bei der Feuchtemessung mittels dielektrischer Verfahren	27
2.3.4 Stand der Forschung zur Untersuchung des Feuchtegehaltes mittels dielektrischer Verfahren	28
2.4 Verfahren zur Messdatenanalyse	31
2.4.1 Einparametrische Verfahren	31
2.4.2 Multivariate Datenanalyse	32
2.4.3 Aufstellung von Berechnungsmodellen	35
2.4.4 Fehlergrößen zur Bewertung der Genauigkeit von Berechnungsmodellen	37
2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung für die eigenen Untersuchungen.....	39
3 Untersuchung des Erhärtungsprozesses	41
3.1 Vorüberlegungen.....	41
3.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	41
3.2.1 Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton	41
3.2.2 Einfluss der Temperatur auf die Messwerte der Mikrowellentechnik.....	48
3.3 Auswertung der Untersuchungen.....	50
3.3.1 Eigenschaften der Parameter und Frequenzverläufe.....	51
3.3.2 Normierung der Druckfestigkeiten	53
3.3.3 Ergebnisse der einparametrischen Datenanalyse	53

3.3.4	Abhängigkeit des Parameters $\Delta MinFI$ von der Druckfestigkeit.....	58
3.3.5	Ergebnisse der multivariaten Datenanalyse.....	59
3.3.6	Kompensation von Temperatureinflüssen.....	65
3.4	Berechnungsmodell zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Beton.....	68
3.4.1	Aufstellung des Berechnungsmodells für das einparametrische Verfahren.....	68
3.4.2	Auswahl von Analyseverfahren und Sensor.....	69
3.4.3	Anwendung des einparametrischen Berechnungsmodells auf verschiedene Betonzusammensetzungen.....	71
3.4.4	Praxisanwendung des Verfahrens.....	76
3.4.5	Genauigkeit der Berechnungsmodelle.....	79
3.5	Zusammenfassung.....	81
4	Untersuchung des kombinierten Erhärtungs- und Trocknungsprozesses...	83
4.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung.....	83
4.1.1	Versuchsaufbau und verwendetes Material.....	84
4.1.2	Untersuchung der Erhärtung und Trocknung von Zementestrich.....	85
4.2	Auswertung der Untersuchungen.....	89
4.2.1	Verlauf des Parameters $MinFI$	90
4.2.2	Einfluss der Probekörperdicke und der klimatischen Verhältnisse während des Trocknungsprozesses.....	91
4.2.3	Zusammenhang von Feuchtegehalt und Feuchteindex.....	93
4.2.4	Einfluss der Wasserbindungsprozesse.....	95
4.3	Berechnungsmodell zur Ermittlung des Feuchtegehaltes für die Belegreife von Zementestrich.....	102
4.3.1	Aufstellung des Berechnungsmodells.....	102
4.3.2	Korrelation der berechneten Mikrowellenfeuchte mit standardisierten Methoden.	103
4.4	Zusammenfassung.....	105
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
5.1	Ergebnisse der Arbeit.....	107
5.2	Anregung für eine weitergehende Forschung.....	110
6	Hinweise für die praktische Anwendung des Mikrowellenverfahrens.....	112
6.1	Eigenschaften der Sensortechnik.....	112
6.2	Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton.....	113
	Literaturverzeichnis.....	115
	Anhang.....	120
	Selbstständigkeitserklärung.....	144
	Lebenslauf.....	145

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Luftporengehalt
b_0	Absolutglied
$b_{1...n}$	Regressionskoeffizienten
e	Fehler
f_c	Betondruckfestigkeit
$f_{c,norm}$	Normierte Betondruckfestigkeit
n	Probenanzahl
r^2	Bestimmtheitsmaß
T_M	Materialtemperatur
T_S	Sensortemperatur
u	Wassergehalt
u_{CM}	CM-Feuchte
u_f	Freie Wassersättigung
u_{hin}	Energie der ins Material laufenden Mikrowellen
$u_{rück}$	Energie der reflektierten Mikrowellen
u_{95}	Gleichgewichtsfeuchte bei 95 % relative Luftfeuchte
x	Messdaten
y	Referenzwerte
\bar{y}	Mittelwert der Referenzwerte
\hat{y}	Berechnete Werte

Griechische Buchstaben

ε	Permittivität
ε_0	Permittivität des Vakuums
ε_r	Materialspezifische Permittivität
ε_r'	Polarisationsfähigkeit
ε_r''	Dielektrische Verluste
ρ	Reflektionsfaktor

Matrizen

$B_{1...n}$	Regressionskoeffizientenmatrix
E	Residuenmatrix (Rauschen)
F	Fehlermatrix
P	Faktorenmatrix
S	Standardabweichung der Messdatenmatrix
T	Gewichtsmatrix
X	Messdatenmatrix (mittenzentriert)
X_A	Messdatenmatrix (Ausgangsparameter)
X_H	Komprimierte Messdatenmatrix (nach der Hauptkomponentenanalyse)
X_M	Mittelwert der Messdatenmatrix

Parameterwerte und Fehlergrößen

$\max. \Delta y$	Maximaler absoluter Fehler
$MinFI_{gem.}$	Gemessener Parameterwert für $MinFI$
$MinFI_M$	Materialtemperaturkompensierter Parameterwert für $MinFI$
$MinFI_s$	Sensortemperaturkompensierter Parameterwert für $MinFI$
$MinFI_{t=0}$	Parameterwert des $MinFI$ zum Beginn der Messung
$MinFI_t$	Parameterwert des $MinFI$ zum jeweiligen Messzeitpunkt
$RMSE$	Mittlerer quadratischer Fehler (Root Mean Square Error)
$\Delta MinFI$	Änderung des Parameters $MinFI$

Abkürzungen

CM	Calciumcarbid-Methode
FI	Feuchteindex
GK	Gesteinskörnungsmenge
Koax	Koaxialsensor
MLR	Multiple Lineare Regression
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PC	Hauptkomponente (Principle Component)
PCA	Hauptkomponentenanalyse (Principle Component Analysis)
PCR	Hauptkomponentenregression (Principle Component Regression)
PLSR	Partial Least Squares Regression
PP	Patch-Antenne
VW	Verbleibende Wassermenge im Beton
R2 / R2P	Streifeld-Resonator

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung der Arbeit

Entsprechend dem Bericht des Institutes für Bauforschung zur „Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenskosten“ aus dem Jahr 2015 [IFB1], haben sich im Betrachtungszeitraum von 2002 bis 2013 die Anzahl der Schäden bei Neubauten um ca. 451 % erhöht.

Der Grund für diese Schäden ist meist eine mangelhafte Bauausführung, wobei Trocknungs- und Erhärtungsprozesse von zementgebundenen Baustoffen eine große Rolle spielen. Am Beispiel zementgebundener Estriche ist dessen Trocknungsverhalten bis zum Erreichen der sogenannten Belegreife von großem Interesse. Dies wird derzeit durch genormte zerstörende Methoden (Darr- und CM-Methode) an wenigen Messstellen auf dem Estrich ermittelt. Darüber hinaus sind keinerlei zerstörungsfreie Messungen möglich, welche systematische und kontinuierliche Aussagen zum Erhärtungs- und Trocknungsprozess dieser zementgebundenen Baustoffe liefern. Des Weiteren können Gründe für Schäden an zum Beispiel Betonbauteilen die falsche Einschätzung von betontechnologischen Eigenschaften sein. Die gewünschten Eigenschaften des Betons werden meist im Vorfeld in Laboren geprüft und eingestellt (z. B. Druckfestigkeit nach DIN EN 12390), wie sich aber der Beton später auf der Baustelle bei unterschiedlichen Klimaten verhält, wird kaum berücksichtigt. Zudem werden verstärkt immer neue Betonzusammensetzungen, mit verschiedenen Zusatzmitteln und -stoffen, entwickelt. Aufgrund der Vielfalt dieser Zusammensetzungen, lässt sich das Erhärtungsverhalten des Betons nicht mehr ausreichend genau vorhersagen. Für eine qualitativ hochwertige Erstellung von Betonbauteilen unter dem Aspekt einer langfristig zu gewährleistenden Dauerhaftigkeit, sind aber Informationen über die Eigenschaften des jungen Betons von großer Bedeutung. Dabei ist es unabdingbar, dass diese Informationen nicht von Prüfkörpern stammen, die entweder im Vorfeld oder baubegleitend erstellt werden, sondern vom jeweiligen Bauteil selbst. Um mängelfreie Bauwerke aus zementgebundenen Materialien zu errichten, wäre eine möglichst genaue Bestimmung des Trocknungs- und Erhärtungsverhaltens direkt am Bauteil von großer Bedeutung. Ein solches Verfahren würde das Schadensrisiko und somit die Kosten für mögliche Mängelbeseitigungen beträchtlich senken.

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Verbesserung der oben genannten Problematik zu erarbeiten. Zur zerstörungsfreien Untersuchung des Trocknungs- oder Erhärtungsprozesses von zementgebundenen Baustoffen gibt es eine Vielzahl von Messmethoden und -verfahren. So kann die Erhärtung von Beton zum Beispiel mit Hilfe von

Ultraschalltechnik quantifiziert werden. Zur zerstörungsfreien Untersuchung des Feuchtezustandes von zum Beispiel Zementestrichen können unter anderen die Messung der elektrischen Leitfähigkeit oder Kapazität des Materials, die Messung der Interaktion von Wassermolekülen in einem elektromagnetischen Feld (Dielektrische Messverfahren) oder minimalinvasive Verfahren, wie das Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren angewendet werden. Ein dielektrisches Feuchtemessverfahren, welches beide Prozesse aus Trocknung und Erhärtung zementgebundener Baustoffe erfasst, ist die Mikrowellentechnik. Die Mikrowellen erreichen dabei nur das freie und physikalisch schwach gebundene Wasser im Baustoff [Kup1] (siehe Abbildung 1.1 und Abschnitt 2.1). Dies lässt einen direkten Bezug einerseits zur chemischen Wasserbindung während der Erhärtung und andererseits zum Verlust von freiem und physikalisch gebundenem Wasser während des Trocknungsprozesses zu.

Mit Hilfe der zerstörungsfreien Mikrowellentechnik soll in der vorliegenden Arbeit das Trocknungsverhalten untersucht und ein Verfahren zur Ermittlung der Druckfestigkeitsentwicklung auf der Baustelle entwickelt werden. Die oben genannten genormten Methoden dienen dabei als Vergleichswerte für die Mikrowellentechnik.

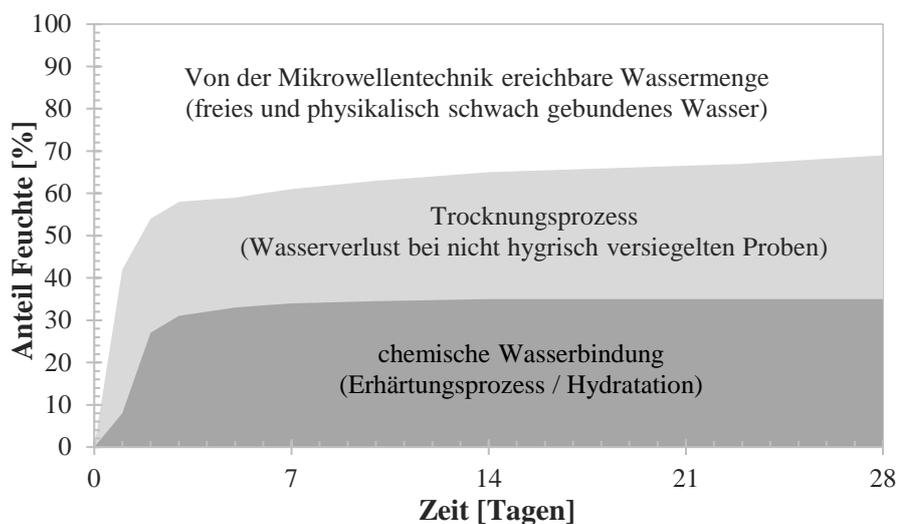


Abbildung 1.1: Von der Mikrowellentechnik erreichbare Anteile an Feuchte im zementgebundenen Baustoff.

1.2 Vorgehensweise

Zur Umsetzung der im vorstehenden Abschnitt genannten Ziele der Arbeit werden die Prozesse aus Erhärtung und Trocknung untersucht. Dabei soll der Prozess der Erhärtung erst separat und im Weiteren in Kombination mit dem Trocknungsprozess betrachtet werden (Abbildung 1.2). Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass eine Untersuchung des Trocknungsprozesses für die Bestimmung der Belegreife von Zementestrichen nur in

Kombination mit dem Erhärtungsprozess erfolgen kann. Aus der Untersuchung des Erhärtungsprozesses sollen Rückschlüsse auf den kombinierten Prozess gezogen werden und somit der Trocknungsprozess sichtbar werden. Gleichzeitig soll aus der Untersuchung des Erhärtungsprozesses ein Berechnungsmodell unabhängig von der Trocknung erstellt werden, wobei die Druckfestigkeit von Beton als Referenzwert dient. Aus der Untersuchung des kombinierten Prozesses soll ein Berechnungsmodell erstellt werden, welches beide Prozesse aus Erhärtung und Trocknung abbilden kann und Rückschlüsse auf den Feuchtegehalt für die Ermittlung der Belegreife von Zementestrichen zulässt.

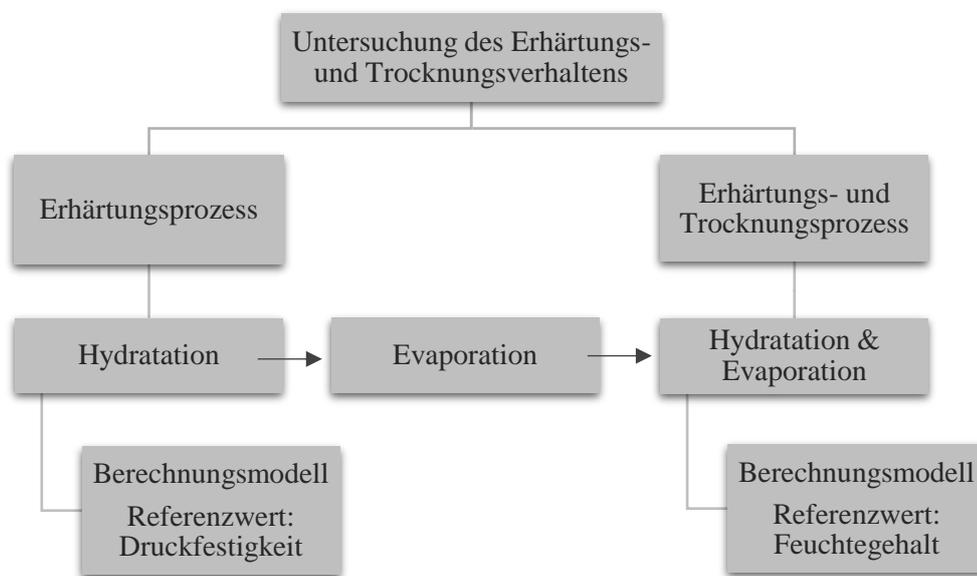


Abbildung 1.2: Übersicht der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

In Kapitel 2 werden dazu die Grundlagen der Mikrowellentechnik sowie der Prozesse aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe vorgestellt. Im Weiteren sollen Verfahren zur Analyse von Messdaten erläutert werden und es erfolgt eine Vorstellung vorangegangener Arbeiten zur Untersuchung der Prozesse aus Erhärtung und Trocknung.

In Kapitel 3 wird die Untersuchung des Erhärtungsprozesses erläutert, wobei neben der Vorstellung der Versuchsdurchführung auch die Auswertung der Untersuchungen sowie die Aufstellung des Berechnungsmodells für den Erhärtungsprozess erfolgt. Das Kernstück hierbei ist die Anwendung verschiedener Sensoren und Datenanalyseverfahren, um die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton abbilden zu können.

In Kapitel 4 wird die Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung erläutert, hierbei wird erneut die Versuchsdurchführung und die Auswertung der Untersuchungen betrachtet sowie die Aufstellung des Berechnungsmodells

beschrieben. Zentraler Punkt dieses Kapitels ist die Betrachtung unterschiedlicher Wasseranteile im Baustoff und deren Einfluss auf die zerstörungsfreie aber auch zerstörende Feuchtemessung.

In Kapitel 5 erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen dieser Arbeit, verbunden mit einem Ausblick bzw. Anregungen für die zukünftige Forschung.

In Kapitel 6 werden im Weiteren spezifische Hinweise zur praktischen Anwendung der Mikrowellentechnik gegeben.

2 Stand des Wissens

Eine Untersuchung des Erhärtungs- und Trocknungsprozesses zementgebundener Baustoffe mittels Mikrowellentechnik setzt voraus, dass einerseits die Funktionsweise der auf Mikrowellen basierenden Messtechnik und andererseits die während der Erhärtung und Trocknung ablaufenden Prozesse bekannt sind. Dabei steht die Messung der Mikrowellen immer in Verbindung mit den verschiedenen Wasseranteilen im zementgebundenen Baustoff, wobei nur bestimmte Anteile von der zerstörungsfreien Messtechnik erfasst werden können [Kup1].

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die Wechselwirkung der Mikrowellen mit dem zu untersuchenden Material vorgestellt, gleichzeitig werden spezifische Eigenschaften der Sensortechnik betrachtet. Die Messgrößen¹ der Mikrowellentechnik sollen mit Kenngrößen der Erhärtung und Trocknung verknüpft werden, hierzu werden die Grundlagen des Erhärtungsverhaltens (Abschnitt 2.2) und des Feuchtegehaltes erhärteter zementgebundener Baustoffe (Abschnitt 2.3) erläutert. Im Fokus stehen dabei die Strukturbildungs- und Wasserbindungsprozesse während der Erhärtung sowie die Feuchteabgabe im Laufe des Trocknungsprozesses. Neben der Erläuterung der Grundlagen erfolgt im jeweiligen Abschnitt eine Vorstellung vorangegangener Untersuchungen zu den Prozessen aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe mittels dielektrischer Verfahren.

Zur Verknüpfung der Messgrößen der Mikrowellentechnik mit Kenngrößen der Erhärtung und Trocknung können unterschiedliche Datenanalyseverfahren genutzt werden. Abschnitt 2.4 beinhaltet eine Erläuterung der in den eigenen Untersuchungen genutzten Verfahren, wobei neben einparametrischen Verfahren auch eine multivariate Datenanalyse vorgestellt wird.

2.1 Grundlagen der Mikrowellentechnik

Die Mikrowellentechnik gehört zu den dielektrischen Messverfahren, welche die Wechselwirkung von Ladungsträgern oder Dipolen in einem elektromagnetischen Wechselfeld² nutzen. Die Mikrowellen bringen polare Moleküle zum Schwingen. Wasser ist ein polares Molekül und die Wechselwirkung des Wassermoleküls im elektromagnetischen Feld ist im Vergleich mit der von Baustoffen, darunter auch zement-

¹ Die genutzte Messgröße der Mikrowellentechnik wird in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt. Eine Erläuterung der in den eigenen Untersuchungen genutzten spezifischen Parameter der Mikrowellenmessung erfolgt in Abschnitt 3.3.1.

² Frequenzbereich der Mikrowellen: 300 MHz bis 100 GHz [Tis1]

gebundene Baustoffe, groß. Diese große Wechselwirkung des Wassermoleküls beruht darauf, dass die positiven und negativen Ladungsschwerpunkte im Wassermolekül örtlich nicht zusammenfallen [Kup1], [Ben1]. Die Sauerstoff- und Wasserstoffatome besitzen unterschiedliche Elektronegativitäten, was zur Bildung eines Dipols führt [Wer1]. Die Stärke des Dipols kann mit der Polarisierbarkeit beschrieben werden, dabei ist die Polarisierbarkeit ein Maß dafür, wie stark sich die Ladungen beim Anlegen eines äußeren elektromagnetischen Feldes voneinander verschieben lassen. Werden Wassermoleküle in ein elektromagnetisches Wechselfeld gegeben, so beginnen sie sich an der Frequenz des Feldes auszurichten. Die Verschiebung der Ladungen verbraucht Energie, welche messtechnisch erfasst werden kann.

2.1.1 Theoretische Beschreibung der Polarisierbarkeit

Theoretisch beschrieben wird die Polarisierbarkeit von Materialien mit der sogenannten relativen Permittivität ε (Gleichung 2.1), wobei die Permittivität frequenzabhängig ist und als Vielfaches der Permittivität des Vakuums ε_0 angegeben wird. Die Permittivität drückt somit aus, um welchen Faktor das betreffende Material eine größere Durchlässigkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern besitzt als das Vakuum³. Der Faktor ε_r ist dabei die relative Permittivität des Materials.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad 2.1$$

Die materialspezifische relative Permittivität ε_r (Gleichung 2.2) ist eine dimensionslose Größe und setzt sich aus der komplexen Summe der Polarisationsfähigkeit des Materials ε_r' und der dielektrischen Verluste ε_r'' zusammen.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\varepsilon_r'' \quad 2.2$$

Die eingesetzte Mikrowellenmesstechnik nutzt eine Frequenz von 2,45 GHz ($2,45 \cdot 10^9$ Hz). Bei dieser Frequenz besitzen die Wassermoleküle eine große Polarisationsfähigkeit und im Vergleich zu anderen Frequenzbereichen relativ geringe dielektrische Verluste (Abbildung 2.1). Der dielektrische Effekt ist bei Wasser so stark ausgeprägt, dass die Permittivität mit 80 angegeben wird [Kup1]. Bei den meisten Baustoffen ist ε_r wesentlich kleiner und liegt im Bereich von zwei bis zehn.

³ Permittivität des Vakuums: $\varepsilon_r = 1$ [Kup1]

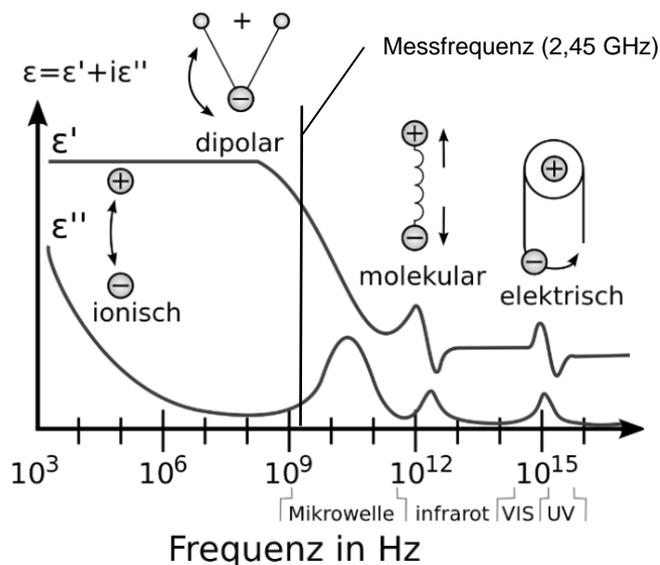


Abbildung 2.1: Frequenzabhängige Permittivität des Wassermoleküls nach [Mau1].

2.1.2 Funktionsweise der Mikrowellenmesstechnik

Praktisch umgesetzt wird die Messung der Polarisierbarkeit von Materialien mittels spezieller Sensoren. Die Funktionsweise und die Eigenschaften einiger Sensoren, soweit für das Verständnis der weiteren Abschnitte nötig, sollen im Folgenden erläutert werden.

Die grundlegenden Aussagen wurden dabei aus den Arbeiten von KNÖCHEL [Knö1], GÖLLER [Göll1], [Göll2] und SOKOLL [Sok1] entnommen.

Elektrotechnisch gesehen werden die elektromagnetischen Wellen der Sensoren mittels eines Schwingkreises, bestehend aus einer Spule und einem Kondensator, erzeugt. Dabei wird Energie zwischen dem magnetischen Feld der Spule und dem elektrischen Feld des Kondensators periodisch ausgetauscht [Knö1]. Messtechnisch erfasst wird der Energieverlust beim Durchlaufen der Mikrowellen durch das Material, welches durch die Polarisationsfähigkeit sowie Streuungen und Reflektionen der Mikrowellen im Material hervorgerufen wird. Dieser Energieverlust äußert sich dabei in der Änderung der Amplitude und/oder einer Phasenverschiebung der Mikrowellen, wobei sich der Betrag aus elektrischer und magnetischer Welle ändert.

Die im Weiteren vorgestellte Sensortechnik basiert dabei auf dem Reflektionsprinzip. Dazu besitzen die Sensoren einen Signalgeber und einen Signalempfänger, wobei sowohl die Energie der ins Material hineinlaufenden u_{hin} als auch die Energie der vom Material reflektierten Mikrowelle $u_{rück}$ gemessen wird. Der Quotient aus reflektierter und hineinlaufender Mikrowelle bildet den dimensionslosen Reflektionsfaktor ρ (Gleichung 2.3).

Zur Skalierung der Messwerte und um Relativmessungen zu ermöglichen, wird der Reflektionsfaktor mittels einer Skalierungsfunktion⁴ in einen dimensionslosen Feuchteindex (FI) umgerechnet (Gleichung 2.4).

$$\rho = \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}} \quad 2.3$$

$$FI = m \cdot \rho + n \quad 2.4$$

Die Sensoren messen dabei in einem schmalen Frequenzband (Frequenzindex) etwas unterhalb und oberhalb der Messfrequenz von 2,45 GHz (siehe Tabelle 2.1). Aus den Einzelmessungen im Frequenzband entsteht beim Durchlaufen der Frequenzen eine Messkurve (Abbildung 2.2), welche bei resonanten Sensoren einer Resonanzkurve entspricht. Abhängig von der Polarisierbarkeit des Baustoffs, d. h. vom polarisierbaren Anteil im Baustoff, zeigt sich eine stärkere oder schwächere Dämpfung der Feuchteindizes. Prinzipiell gilt, je feuchter der Baustoff ist, desto stärker ist die Dämpfung und desto höher ist der gemessene Feuchteindex im Scheitelpunkt der Resonanzkurve [Göl2].

Der Feuchteindex wird dabei in einem bestimmten Volumen gemessen. Die Sensoren sind Volumenmessköpfe, wobei die Eindringtiefe abhängig von der Dichte und der Feuchte des Materials ist. Grundsätzlich kann folgende Aussage getroffen werden: Je höher die Permittivität des Materials ist, desto geringer ist die Eindringtiefe des Sensors. Auf eine detaillierte Darstellung der Einflüsse wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Arbeit von KUPFER [Kup1] verwiesen.

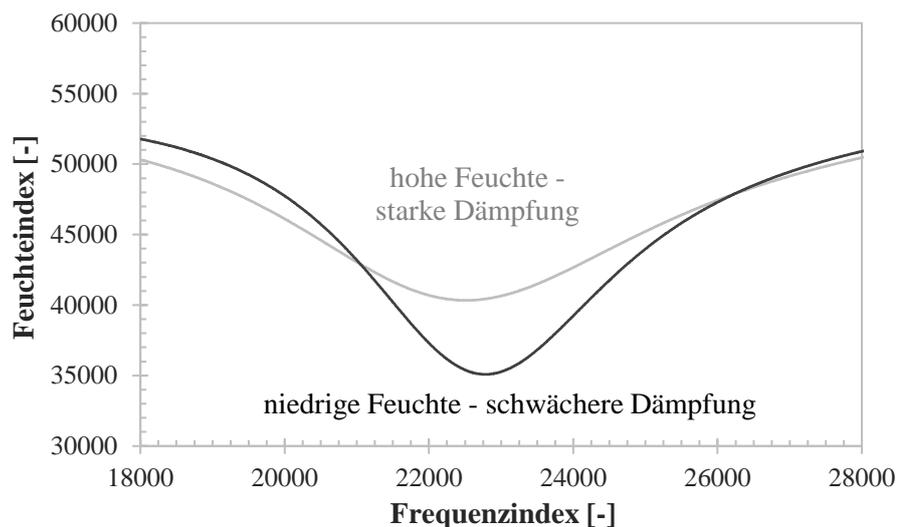


Abbildung 2.2: Beispiel von Resonanzkurven mit starker und schwächerer Dämpfung.

⁴ Aus Datenschutzgründen werden die Faktoren m und n der Skalierungsfunktion an dieser Stelle nicht näher benannt.

2.1.3 Aufbauten und Eigenschaften der Sensoren

Die Sensoren besitzen unterschiedliche Aufbauten und spezifische Eigenschaften, welche im Folgenden näher vorgestellt werden sollen.

Die im Weiteren vorgestellten Sensor- oder Antennenaufbauten sind:

- Streufeld-Resonator (R2/R2P)
- Patch-Antenne (PP)
- Koaxial-Sensor (Koax)

Der Unterschied zwischen dem Sensor R2 und R2P liegt in der Messwertauflösung und somit der Genauigkeit der Sensortechnik. Dabei besitzt der R2 eine geringere Auflösung der Feuchteindizes von 0 bis 4000 im Vergleich mit den Sensoren R2P, PP und Koax (0 bis 60000).

Die Sensoren nutzen dabei unterschiedliche Messprinzipien, wobei die Sensoren R2 und Koax ein Streufeld besitzen und der Sensor PP mittels eines Antennenaufbaus das elektromagnetische Feld erzeugt (Abbildung 2.3).

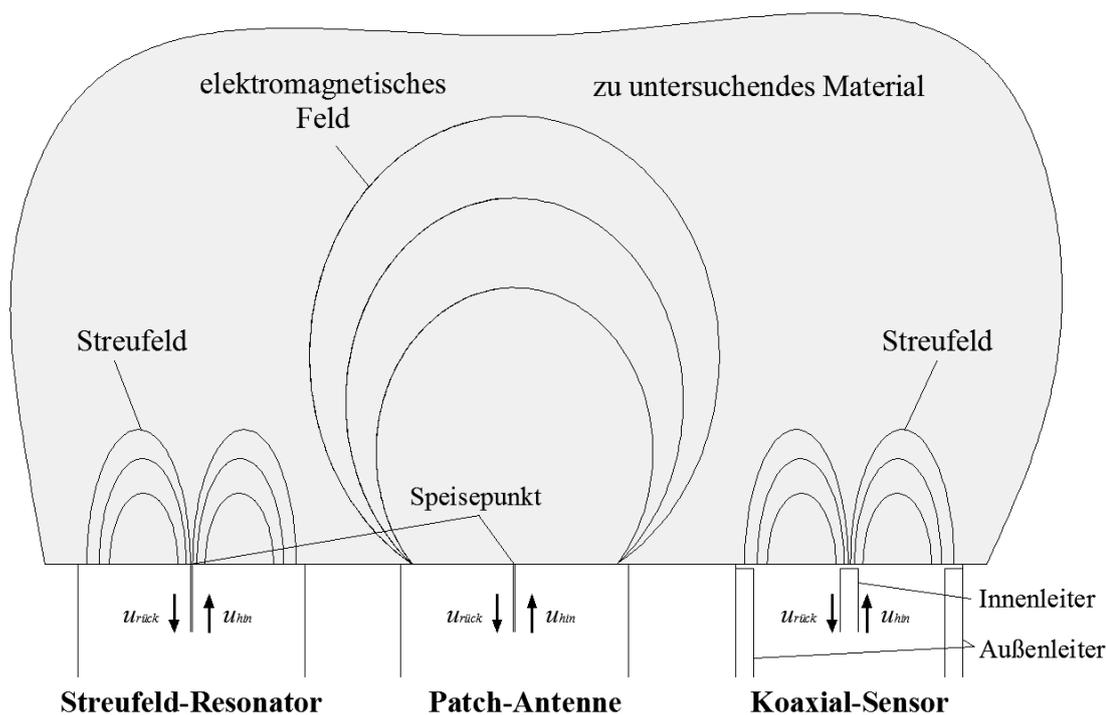


Abbildung 2.3: Messprinzipien der Sensoren.

Der *Streufeld-Resonator* (R2/R2P) erreicht eine Eindringtiefe von ca. 40 bis 50 mm in das zu untersuchende Material. Dabei besitzt der Sensor R2/R2P im Vergleich mit den Sensoren PP und Koax eine hohe Sensitivität gegenüber polarisierbaren Stoffen. Die Wichtung der Volumenelemente nimmt jedoch mit der Tiefe ab, somit werden verstärkt

oberflächennahe Schichten gemessen. Die Messkurve des Sensors zeigt eine resonante Form, wobei die Feuchteindizes in einem Frequenzband von ca. 2,30 bis 2,55 GHz gemessen werden. Abbildung 2.4 a) zeigt den sichtbaren Aufbau des Sensorkopfes.

Die *Patch-Antenne* (PP) arbeitet mit einer in das Material hineinlaufenden elektromagnetischen Welle (Messfrequenz 2,30 bis 2,55 GHz), was größere Eindringtiefen von 50 bis 150 mm im Vergleich zum Streufeld-Resonator erlaubt. Die Sensitivität gegenüber polarisierbaren Stoffen ist jedoch, aufgrund des Antennenaufbaus, kleiner. Die Wichtung der Volumenelemente bei der Feuchtemessung nimmt bei der Patch-Antenne mit der Tiefe ab, wobei der Einfluss oberflächennaher Schichten vernachlässigbar klein ist. Das tiefere Eindringen der elektromagnetischen Wellen bewirkt aber auch eine seitliche Ausbreitung des Messvolumens, was zur Folge hat, dass ein Mindestabstand zu den seitlichen Begrenzungen des Messgutes eingehalten werden muss. Wie der Streufeld-Resonator besitzt auch die Patch-Antenne eine typische Resonanzkurve. Den sichtbaren Aufbau des Sensorkopfes zeigt Abbildung 2.4 b).

Der *Koaxial-Sensor* erzeugt wie der Resonator ein Streufeld. Aufgrund des Sensoraufbaus besitzt er jedoch keine ausgeprägte Resonanzkurve, sondern ein Spektrum, welches sich aus der Mischung der dielektrischen Eigenschaften des zu untersuchenden Materials ergibt. Die Eindringtiefe des Sensors beschränkt sich dabei auf die oberflächennahen Schichten und beträgt ca. 10 mm. Im Vergleich mit den Sensoren R2 / R2P und PP ist jedoch das Frequenzband der Messung größer, es liegt zwischen 2,0 und 3,0 GHz. Dies bietet den Vorteil, dass zur Auswertung der Messsignale andere Frequenzbereiche, im Vergleich mit den Sensoren R2 / R2P und PP, zur Verfügung stehen.

Einen Überblick über die relevanten Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der Sensoren gibt die folgende Tabelle 2.1.

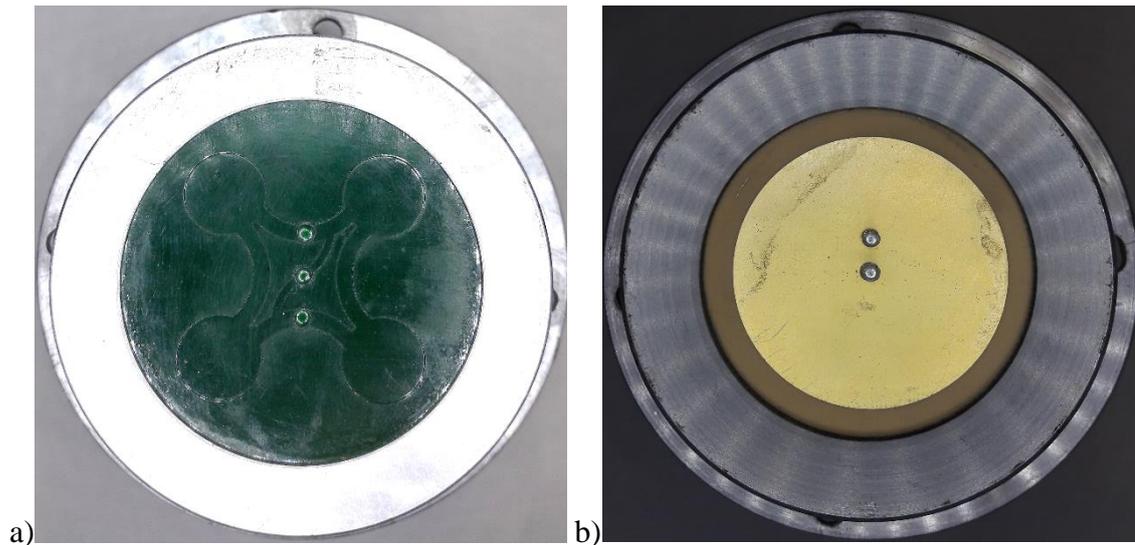


Abbildung 2.4: Aufbau der Sensorköpfe für die Sensoren R2P a) und PP b).

Tabelle 2.1: Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der eingesetzten Sensoren.

Sensor	Eindringtiefe	Messkurve	Vorteil	Nachteil
Streufeld-Resonator (R2/R2P)	40-50 mm	resonant (2,30-2,55 GHz)	hohe Sensitivität gegenüber polarisierbaren Stoffen	- geringe Eindringtiefe - Einfluss oberflächennaher Schichten
Patch-Antenne (PP)	50-150 mm	resonant (2,30-2,55 GHz)	große Eindringtiefe (Messvolumen)	geringe Sensitivität gegenüber polarisierbaren Stoffen
Koaxial-Sensor (Koax)	ca. 10 mm	spektral (2,0-3,0 GHz)	Messung in einem größeren Frequenzband	- geringe Eindringtiefe - Einfluss oberflächennaher Schichten

2.2 Erhärtung zementgebundener Baustoffe

Die Grundlagen der während der Erhärtung von zementgebundenen Baustoffen ablaufenden Prozesse sollen im Folgenden anhand des prinzipiellen Ablaufs, der Strukturbildung und der Wasserbindung während der chemischen Reaktion näher erläutert werden. Des Weiteren wird auf die funktionelle Beschreibung des Erhärtungsprozesses eingegangen und vorangegangene Arbeiten zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses mittels Mikrowellentechnik vorgestellt.

Die grundlegenden Aussagen zum Ablauf, der Strukturbildung und der Wasserbindung während des Erhärtungsprozesses, wurden den Arbeiten von RÖHLING [Röh2], [Röh3], STARK & WICHT [Sta1], [Sta2], [Sta3] sowie [VDZ1] entnommen.

2.2.1 Grundlagenbetrachtung

Der Erhärtungsprozess von zementgebundenen Baustoffen ist eine komplexe exotherme chemische Reaktion zwischen dem Zement und dem Anmachwasser, währenddessen es zu unterschiedlichen chemischen Reaktionen mit verschiedenen Reaktionspartnern des Zementes kommt. Diese verschiedenen Reaktionspartner entstehen beim Brennen der Zementausgangstoffe und sind unter anderem die Klinkerphasen Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit (C_4AF). Die Klinkerphasen reagieren bei Wasserzugabe zu den sogenannten Hydratphasen, wobei komplexe Reaktionsprodukte auftreten, welche im Allgemeinen stark vereinfacht beschrieben werden [Röh3].

Der Ablauf der chemischen Reaktion ist dabei nicht kontinuierlich, der Prozess kann in mehrere Perioden mit unterschiedlich hoher Reaktivität eingeteilt werden (Abbildung 2.5). Dabei kommt es zu Beginn des Erhärtungsprozesses zu einer kurzen, aber intensiven Reaktion der Oberfläche der Zementpartikel mit dem Anmachwasser. Diese sogenannte Induktionsperiode ist auf die ersten 60 bis 90 Minuten des chemischen Prozesses beschränkt. Nach dieser ersten starken Reaktion folgt im Weiteren eine Ruhephase, welche auf die Bildung einer dünnen Trisulfatschicht (Ettringitschicht) auf der Oberfläche der Zementpartikel zurückzuführen ist, den Wassertransport ins Innere der Zementpartikel behindert und somit die chemische Reaktion stark verlangsamt. Infolge des Anstiegs des osmotischen Drucks und dem Aufbrechen der dünnen Schicht steigt nach etwa vier bis sechs Stunden die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion (Akzelerationsperiode). Die Reaktivität des Erhärtungsprozesses erreicht nach etwa zehn Stunden das Maximum, klingt asymptotisch aus (Dezelerationsperiode) und geht schlussendlich in das Endstadium des Prozesses über.

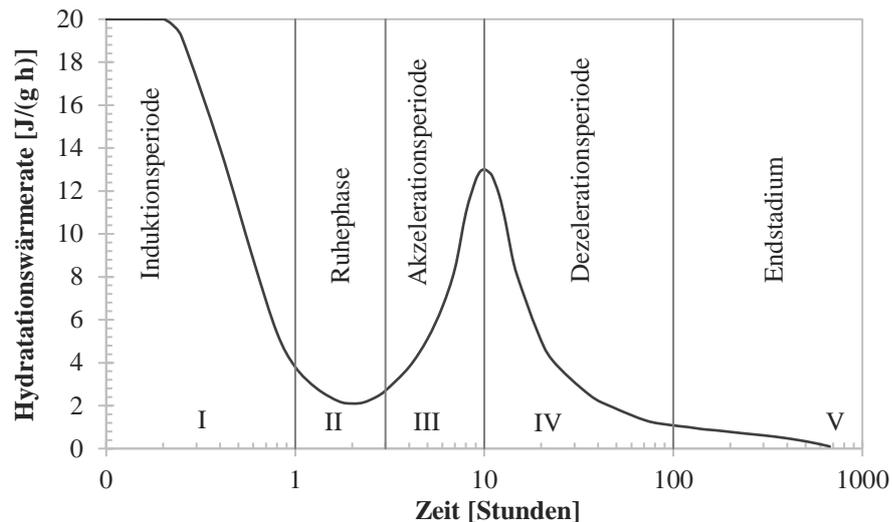


Abbildung 2.5: Prinzipieller Ablauf des Erhärtungsprozesses am Beispiel der Hydrationswärme nach [Röh1].

Strukturbildung während des Erhärtungsprozesses

Zur Bildung der inneren Struktur während des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe sind vor allem die sogenannten Calciumsilicathydrate (CSH) maßgebend [Kei1]. Die CSH-Phasen entstehen dabei vorwiegend aus dem C_3S und dem C_2S .

Sehr anschaulich zeigt Abbildung 2.6 die Bildung der Reaktionsprodukte und die damit verbundene Struktur des Gefüges. Dabei verursacht die zu Beginn ablaufende kurze aber intensive Reaktion des Zementes mit dem Anmachwasser, dass sich eine feinkristalline, nadelförmige Struktur auf der Oberfläche der Zementpartikel bildet. Das sich bildende Trisulfat verlangsamt die chemische Reaktion stark, wobei diese anfängliche, lediglich auf der Oberfläche der Zementpartikel stattfindende Reaktion die Beweglichkeit der Zementpartikel nur unwesentlich beeinflusst, sodass das Material seine Konsistenz kaum ändert und verarbeitbar bleibt. Erst das Aufbrechen der membranartigen Trisulfatschicht auf der Oberfläche der Zementpartikel bewirkt die Bildung größerer nadelförmiger Kristalle, welche in den Raum zwischen den Zementpartikeln hineinwachsen und für ein erstes Ansteifen des Materials sorgen. Im weiteren Verlauf der Reaktion bilden sich erst langfaserige, dann kurzfaserige CSH-Phasen, welche stetig das Gefüge verdichten, den Porenraum verkleinern und für die Strukturbildung des Gefüges verantwortlich sind [VDZ1].

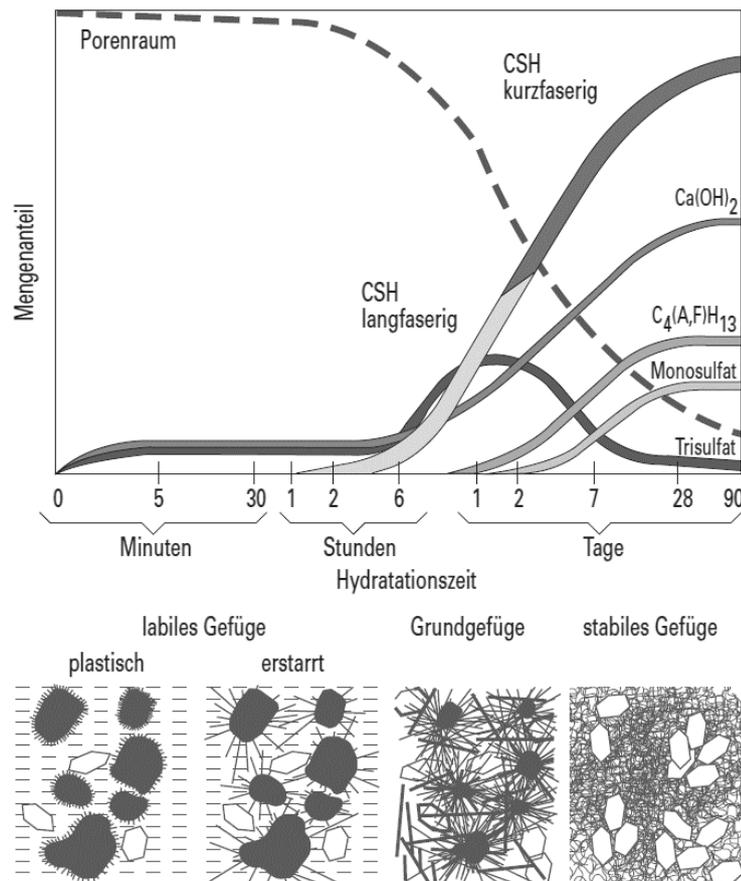


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Entwicklung der Hydratphasen während des Hydratationsprozesses [VDZ1].

Wasserbindung im Laufe des Hydratationsprozesses

Während der Erhärtungsperioden bindet der Zement unterschiedliche Mengen an Wasser, gleichzeitig kommt es zu verschiedenen Bindungsformen des Anmachwassers mit den Ausgangsstoffen. Der Zement reagiert mit dem Anmachwasser und bindet das Wasser chemisch, parallel werden an den Oberflächen, die sich während dieser Reaktion bildenden Kristalle, Wassermoleküle physikalisch gebunden. Das Wasser, welches nicht chemisch oder physikalisch gebunden wird, verbleibt als freies Wasser im Porensystem des Baustoffs.

Die chemische Reaktion des Zementes mit dem Anmachwasser ist dabei strenggenommen eine Hydrolyse, wobei die Klinkerphasen zerlegt werden und es zur Wassereinlagerung in die Spaltprodukte kommt [Kei1].

Soll die Menge an *chemisch gebundenem Wasser* während des Hydratationsprozesses ermittelt werden, müssen einige Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. So wird davon ausgegangen, dass die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe sowie, deren molare Masse und Dichte bekannt sind. Des Weiteren werden temporäre Zwischenstufen der Reaktion vernachlässigt und die Annahme getroffen, dass stabile Endprodukte

entstehen. Eine Interaktion der Klinkerphasen des Zements wird ausgeschlossen. [Sta2]
 Unter diesen Annahmen können die Reaktionsgleichungen für die einzelnen Klinkerphasen (Gleichungen 2.5 bis 2.8) aufgestellt werden [Röh3]. Die Reaktionen der Phasen C_3A und C_4AF sind dabei sehr komplex und es können nach [Sta2] verschiedene Reaktionen mit unterschiedlichen Endprodukten auftreten. Die hier dargestellten Gleichungen sind nach [Röh3] maßgebend für die chemische Wasserbindung.



Mit der Kenntnis der molaren Massen der Reaktionspartner kann der Anteil des chemisch gebundenen Wassers für die einzelnen Klinkerphasen berechnet werden (Gleichungen 2.9 bis 2.12). Die Menge an chemisch gebundenem Wasser, welches die Hydratphasen C_3A und C_4AF binden, kann dabei abhängig vom Feuchte- und Sulfatangebot stark variieren. Die Wasserbindung von C_3A kann zwischen 8 und 16 mol, die von C_4AF zwischen 7 und 19 mol betragen. [Loc1]

$$w_{C_3S} = \frac{6 \cdot 18}{2 \cdot 228,3} = 0,237 \text{ g } H_2O / \text{ g } C_3S \quad 2.9$$

$$w_{C_2S} = \frac{4 \cdot 18}{2 \cdot 172,3} = 0,209 \text{ g } H_2O / \text{ g } C_2S \quad 2.10$$

$$w_{C_3A} = \frac{8 \cdot 18}{270,2} = 0,533 \text{ g } H_2O / \text{ g } C_3A \quad 2.11$$

$$w_{C_4AF} = \frac{10 \cdot 18}{486,0} = 0,370 \text{ g } H_2O / \text{ g } C_4AF \quad 2.12$$

Zur Berechnung der gesamten chemischen Wasserbindung ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Zementes notwendig. Der Anteil der Klinkerphasen des Zementes kann mit Hilfe der Berechnung nach BOGUE (siehe [Sta2]) abhängig vom Anteil an Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) im Klinker ermittelt werden. Für einen CEM I 42,5 R ergibt sich nach [Sta2] beispielhaft das folgende Ergebnis (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Anteil der Klinkerphasen für einen CEM I 42,5 R nach [Sta2].

Klinkerphase	Anteil [%]
C_3S	52,3
C_2S	20,5
C_3A	8,2
C_4AF	7,6

Die stöchiometrisch ermittelte Menge chemisch gebundenen Wassers ergibt somit:

$$w_{\text{chemisch}} = 0,523 \cdot 0,237 + 0,205 \cdot 0,209 + 0,082 \cdot 0,533 + 0,076 \cdot 0,370 = \underline{23,9\%} \quad 2.13$$

Ein Portlandzement kann je nach Zusammensetzung eine stöchiometrisch bestimmte chemische Wasserbindung von 23 – 35 M.-% besitzen [Röh3]. Vereinfachend kann die chemische Wasserbindung mit ca. 25 M.-% vom Anteil des Zementes abgeschätzt werden [Röh2].

Neben der chemischen Bindung kommt es an den Hydratoberflächen zur sogenannten physikalischen Bindung von Wasser. Dieses *physikalisch gebundene Wasser* kann aus mehreren molekularen Wasserschichten bestehen, wobei die Bindungskräfte mit jeder weiteren Schicht abnehmen. Die Dicke der Wasserschicht hängt dabei maßgebend vom Wasserdampfpartialdruck ab. Je größer die Hydratoberfläche und der Wasserdampfpartialdruck sind, desto dicker ist die physikalisch gebundene Wasserschicht [Röh3]. Des Weiteren lagert sich Wasser auch als Schichtenwasser zwischen den Hydraten an (siehe Abbildung 2.7).

Das physikalisch gebundene Wasser kann durch Darr-Trocknung [DIN12570] bei 105 °C und ohne die Struktur des Zementsteins zu zerstören ausgetrieben werden. Dabei werden erst die schwach gebundenen Teile des absorbierten Wassers sowie das Zwischenschichtenwasser und später die stärker gebundenen Anteile des absorbierten Wassers erreicht.

Die Wassermenge, welche physikalisch gebunden wird, kann mit ca. 15 M.-% vom Zementanteil abgeschätzt werden [Röh2].

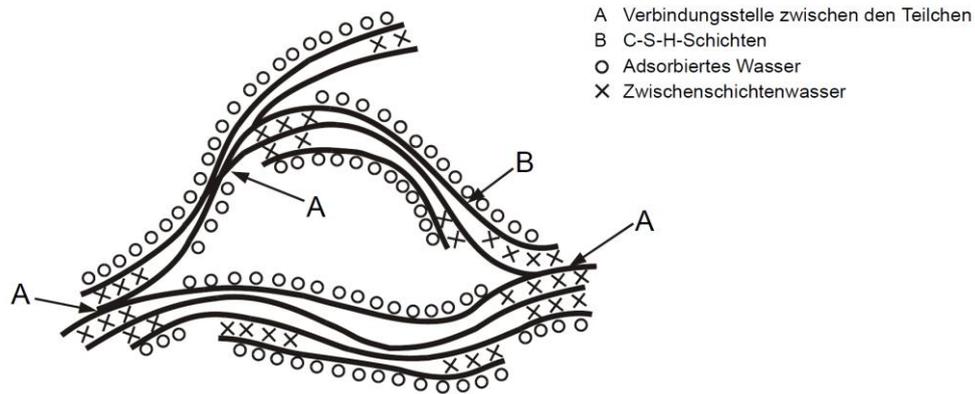


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Anteile des physikalisch gebundenen Wassers [Fe1].

2.2.2 Funktionelle Beschreibung des Erhärtungsprozesses

Eine funktionelle Beschreibung der chemischen Reaktion während des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe ist sehr komplex. Um den Prozess mathematisch beschreiben zu können, werden bestimmte Eigenschaften, wie zum Beispiel die Druckfestigkeit, der Hydratationsgrad oder die Wärmefreisetzung genutzt. Der Hydratationsgrad ist dabei ein Maß dafür, wieviel Zement durch den Hydratationsprozess bereits umgewandelt wurde. Gleichzeitig kann über die Wärmefreisetzung der exothermen Reaktion auf den Fortschritt des Erhärtungsprozesses geschlossen werden. Die Entwicklung der genannten Eigenschaften zeigt dabei in Abhängigkeit von der Zeit einen S-förmigen Kurvenverlauf (Abbildung 2.8).

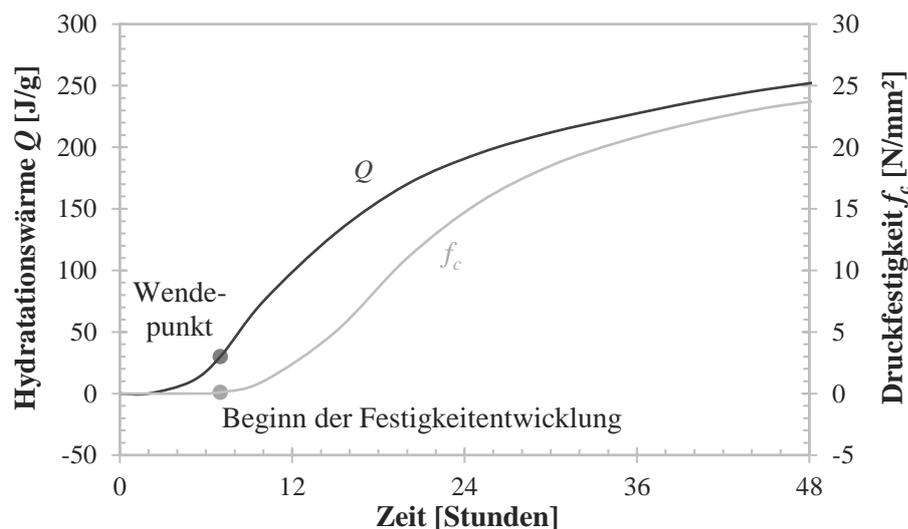


Abbildung 2.8: Entwicklung der Wärmefreisetzung und der Druckfestigkeit im Laufe des Erhärtungsprozesses nach [Röh1].

Dieser Verlauf kann nach [Röh3] mit Hilfe von Exponentialfunktionen beschrieben werden. Für die Beschreibung des Erhärtungsprozesses wird unter anderen die folgende Gleichung verwendet:

$$P(t) = P_{max} \cdot e^{A \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^B} \quad 2.14$$

Der Parameter P beschreibt dabei die Eigenschaft, welche mit Hilfe der Funktion dargestellt werden soll. P_{max} ist der Endwert, welcher maximal erreicht werden kann. Die Faktoren A , B und t_k werden durch Anpassung der Funktion an vorhandene Messwerte, welche aus Untersuchungen gewonnen werden, ermittelt. Eine Auswahl möglicher Regressionsparameter für die Wärmefreisetzung verschiedener Zemente mit einem Wasserzementwert (w/z-Wert) von 0,5 zeigt Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Beispielhafte Regressionsparameter für die Wärmeentwicklung verschiedener Zemente nach [Röh3]⁵.

Zementart	P_{max}	A	B	t_k
CEM I 42,5 R	450	-1,60	-0,73	11,0
CEM II/B-S 32,5 R	400	-1,55	-0,70	8,9
CEM III/A 42,5 N	360	-1,68	-0,86	16,0

Weitere Entwicklungsfunktionen für die Beschreibung des Erhärtungsprozesses von zementgebundenen Baustoffen können dem Anhang A.1 entnommen werden. Der hier aufgeführte funktionelle Zusammenhang der Gleichung 2.14 wird im Weiteren in den eigenen Untersuchungen zur Abbildung der Druckfestigkeitsentwicklung genutzt.

2.2.3 Stand der Forschung zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses mittels Mikrowellentechnik

Die Mikrowellentechnik erfasst mit fortschreitender Bildung und Vernadelung der Kristalle sowie Wasserbindung während des Erhärtungsprozesses die Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Materials. Mit Hilfe dieser Änderung sind Aussagen zur Eigenschaftsentwicklung des Betons möglich.

Gegenwärtig wird der Erhärtungsprozess anhand bestimmter Eigenschaften wie zum Beispiel der Druckfestigkeit beschrieben. Die Druckfestigkeitsentwicklung wird dabei mit Hilfe von zerstörenden Verfahren an separat hergestellten Probekörpern ermittelt [DIN12390], [DIN13892].

⁵ In den eigenen Untersuchungen werden die Regressionsparameter für die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton eigens extrahiert.

Wird die Entwicklung der mit Hilfe des zerstörenden Verfahrens ermittelten Werte mit den Mikrowellenmesswerten gegenübergestellt, so wird eine Verknüpfung der Druckfestigkeit mit der Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Materials möglich.

Im Folgenden sollen vorangegangene Arbeiten zu dieser Thematik vorgestellt werden. Einen Überblick über den Stand der Forschung der Anwendungen von Mikrowellentechnik auf zementgebundene Materialien geben [Mak1] und [But1].

Erste Untersuchungen auf diesem Gebiet wurden unter anderem von RZEPECKA ET AL. [Rze1] durchgeführt. Sie untersuchten den Erhärtungsprozess von Beton mittels Mikrowellentechnik, wobei als Messwerte neben der relativen Permittivität die Druckfestigkeit des Materials genutzt wurde. Ihre Ergebnisse zeigten einen direkten Zusammenhang der relativen Permittivität mit der Druckfestigkeit des Betons und es konnten Einflussfaktoren wie der Wasseranteil, die Zementart und die Temperatur herausgearbeitet werden. So wurde zum Beispiel mit steigendem Wasseranteil im Frischbeton auch eine höhere relative Permittivität gemessen. [Rze1] wiesen auf die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen hin, um die gefundenen Zusammenhänge zu bestätigen.

Weitere Untersuchungen folgten von SCHMIDT [Sch1]. Er setzte die Mikrowellenmesstechnik zur zerstörungsfreien und kontinuierlichen Erfassung der Hydratationskinetik von Mörteln und Betonen ein. In seinen Untersuchungen stellte er den Energieverlust der Mikrowellen mit der Druckfestigkeit eines Betons gegenüber und konnte zeigen, dass das Verfahren über die Erfassung des freien, chemisch ungebundenen Wassers den komplexen physiko-chemischen Prozess phänomenologisch richtig widerspiegelt [Sch1]. Er stellte weiter fest, dass der Prozess der Erhärtung von zementgebundenen Baustoffen eine ständige Änderung der dielektrischen Eigenschaften zur Folge hat und dass diese Änderung ein Maß für den Hydratationsfortschritt ist. Der S-förmige Kurvenverlauf des Energieverlustes der Mikrowellen deutet nach [Sch1] nicht nur daraufhin, dass eine Änderung im Wassergehalt messtechnisch erfasst wird, sondern auch weitere physikalische Phänomene gemessen werden. So zeigte der Verlauf des Energieverlustes der Mikrowellen, in Abhängigkeit von der Zeit, Ähnlichkeiten mit den Erhärtungsperioden. Des Weiteren arbeitete [Sch1] heraus, dass die Kinetik der Strukturbildung von zementgebundenen Baustoffen mit Hilfe von mathematischen Ansätzen beschrieben werden kann.

SHALABY & ZOUGHI [Sha1] untersuchten den Einfluss des w/z-Wertes auf die dielektrischen Eigenschaften und die Druckfestigkeit von Zementleimen. Um eine möglichst hohe Sensitivität der Mikrowellentechnik zu erreichen, untersuchten sie die Zementleime mit unterschiedlichen Messfrequenzen. Im Weiteren verglichen sie die

gemessenen dielektrischen Eigenschaften mit der Druckfestigkeit des Materials. Die Ergebnisse zeigten, dass gerade bei Frequenzen von ~ 5 GHz eine gute Sensitivität der Mikrowellentechnik gegenüber den verschiedenen w/z-Werten vorhanden ist. Es konnte ein klarer Zusammenhang zwischen den dielektrischen Eigenschaften und der Druckfestigkeit gefunden werden. Lediglich die Anzahl der Probekörper war gering, sodass weitere Untersuchungen den genannten Zusammenhang bestätigen werden müssen.

XIAO ET AL. [Xia1] und ZHANG ET AL. [Zha1] untersuchten die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Zementleimes mit fortschreitender Erhärtung des Materials. Dabei fanden sie bei einer Messfrequenz von 1 MHz einen Zusammenhang des elektrischen Widerstandes mit der Entwicklung der Eigenschaften des Materials. Der typische S-förmige Verlauf der Druckfestigkeit während des Erhärtungsprozesses wurde auch im elektrischen Widerstand sichtbar (Abbildung 2.9), woraufhin sie folgerten, dass ein Zusammenhang des Widerstandes mit der Entwicklung der Eigenschaften des Zementleimes existiert.

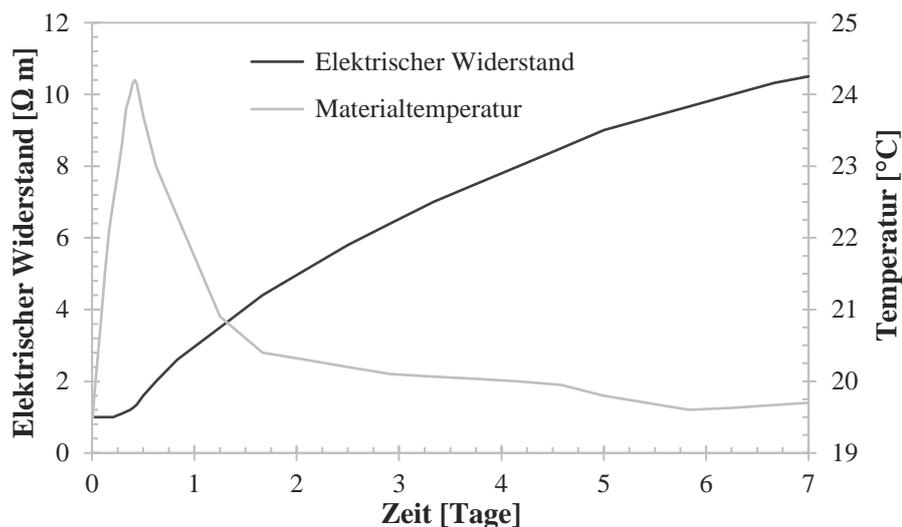


Abbildung 2.9: Änderung des elektrischen Widerstandes und der Materialtemperatur während des Erhärtungsprozesses von Zementleim nach [Zha1].

Untersuchungen von JAMIL ET AL. [Jam1] an Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten zeigten, dass der w/z-Wert einen Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften besitzt. So konnten sie zu Beginn der Messung eine klare Abstufung abhängig vom w/z-Wert herausarbeiten. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Änderung der dielektrischen Eigenschaften im Verlauf des Erhärtungsprozesses für verschiedene w/z-Werte unterschiedlich ist. Abbildung 2.10 zeigt die Verläufe für w/z-Werte von 0,4; 0,5 und 0,6, wobei in den Verläufen neben der Erhärtung des Betons auch die Trocknung abgebildet wird. Sie nutzten für ihre Untersuchungen keine hygriech versiegelten Proben, somit ist eine Trennung der Prozesse aus Erhärtung und Trocknung nicht möglich.

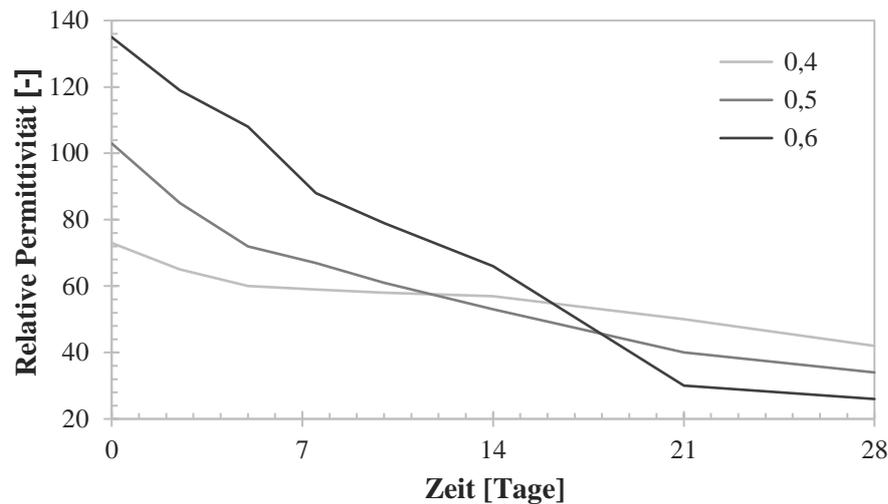


Abbildung 2.10: Änderung der relativen Permittivität im Laufe des Erhärtungsprozesses für Betone mit w/z-Werten von 0,4; 0,5 & 0,6 nach [Jam1].

Neuere Untersuchungen zur Verknüpfung der Druckfestigkeit mit der Änderung der dielektrischen Eigenschaften von Zementmörtel tätigten SHEN ET AL. [She1]. Sie untersuchten mit Hilfe eines Monitoringsystems den Erhärtungsprozess und die Druckfestigkeitsentwicklung eines Portlandzementes. Zur Erfassung der Änderung der dielektrischen Eigenschaften nutzten sie ein reflexives Verfahren und konnten zeigen, dass in einem Frischbeton unterschiedliche w/z-Werte in den dielektrischen Eigenschaften des Materials sichtbar werden (Abbildung 2.11). Sie arbeiteten für einen w/z-Wert von 0,5 einen linearen Zusammenhang zwischen den dielektrischen Eigenschaften und der Druckfestigkeit des Materials heraus (Abbildung 2.12). Des Weiteren war es ihnen mit Hilfe der Amplitude des reflektierten Mikrowellensignals möglich, direkt auf die Hydratationsperioden zu schließen. Auf weiteren Forschungsbedarf zur Korrelation der Druckfestigkeit mit den dielektrischen Eigenschaften des Zementmörtels für verschiedener Zementarten und unterschiedlicher w/z-Werte wiesen sie hin.

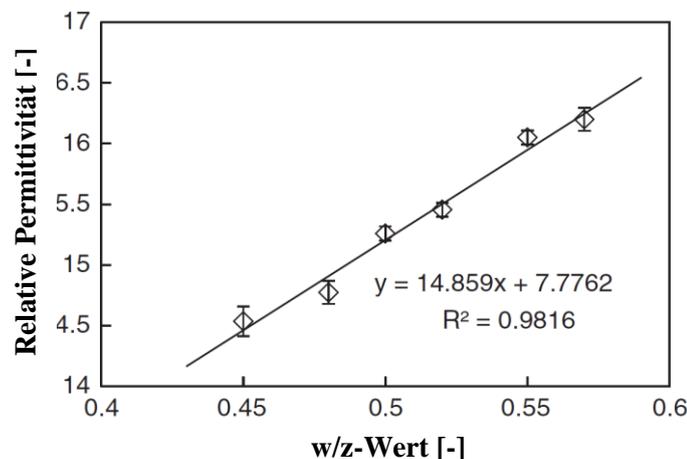


Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen der relativen Permittivität und dem w/z-Wert eines frischen Zementmörtels nach [She1].

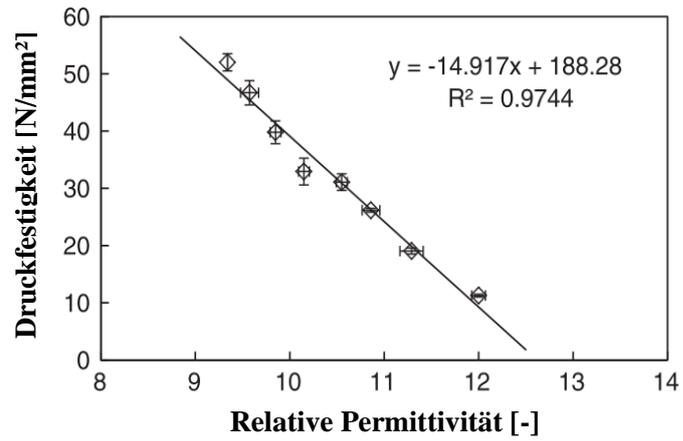


Abbildung 2.12: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der relativen Permittivität von Zementmörtel nach [She1].

2.3 Feuchte in erhärteten zementgebundenen Baustoffen

Neben der in Abschnitt 2.2.1 erläuterten chemischen- und physikalischen Wasserbindung während des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe, speichert der Baustoff auch freies Wasser. Vor diesem Hintergrund sollen im Folgenden die Grundlagen zur Feuchte in erhärteten zementgebundenen Baustoffen und der Begriff der Belegreife sowie deren Messung erläutert werden. Des Weiteren werden Untersuchungen zur Bestimmung des Feuchtegehaltes in erhärteten zementgebundenen Baustoffen mittels dielektrischer Verfahren vorgestellt.

Die grundlegenden Aussagen zum Feuchtegehalt poröser mineralischer Baustoffe wurden den Arbeiten von HÄUPL ET AL. [Häu1], RÖHLING [Röh3] und KRUS [Kru1] entnommen. Weiterführende Untersuchungen zur Belegreife und möglicher Schäden infolge zu hoher Estrichfeuchte sind unter anderen die Arbeiten von [Sch2], [Aur1], [Rol1] und [Tim1].

2.3.1 Grundlagenbetrachtung

Der Feuchtegehalt poröser mineralischer Baustoffe reicht im Allgemeinen von der absoluten Trockenheit bis zur vollständigen Porensättigung. Dabei werden im Wesentlichen zwei Wassergehaltsbereiche unterschieden, welche zum einen der hygroskopische und zum anderen der überhygroskopische Wassergehaltsbereich sind (Abbildung 2.13).

Im sogenannten hygroskopischen Bereich besitzt der Baustoff einen geringen Feuchtegehalt, welcher bis zur Gleichgewichtsfeuchte u_{95} bei einer relativen Luftfeuchte von 95 % reicht. Im Porensystem des Baustoffs sind dabei molekulare und dampfförmige Transportprozesse aktiv, und Adsorptions- bzw. Desorptionsvorgänge stehen im Gleichgewicht. Es stellt sich, abhängig von der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luftschicht, eine Ausgleichsfeuchte ein. Eine Beschreibung der Vorgänge im hygroskopischen Feuchtebereich kann mit Hilfe der Sorptionsisotherme erfolgen.

Im Bereich der überhygroskopischen Wassergehalte besitzt der Baustoff eine erhöhte Feuchte, welche größer als die Gleichgewichtsfeuchte u_{95} ist. Es werden die Bereiche der Kapillarwassersättigung und der Übersättigung unterschieden. Im Kapillarwasserbereich ist der Porenraum teilweise mit Wasser gefüllt, wobei die Verteilung unterschiedlich ist. Die Feuchtespeicherung erfolgt dabei beginnend bei den kleinsten Poren und setzt sich bei den größeren fort. Der Zustand der freien Wassersättigung u_f stellt sich in porösen mineralischen Baustoffen ein, wenn diese eine ausreichend lange Zeit unter Einwirkung von drucklosem Wasser gelagert wurden. Der Übersättigungsbereich und somit die

maximale Wasseraufnahme wird im Baustoff nur erreicht, wenn alle Hohlräume mit Wasser gefüllt sind. Dies kann im Allgemeinen nur unter Wasserdruckeinwirkung erreicht werden, da die eingeschlossene Luft im Porengefüge entweichen muss.

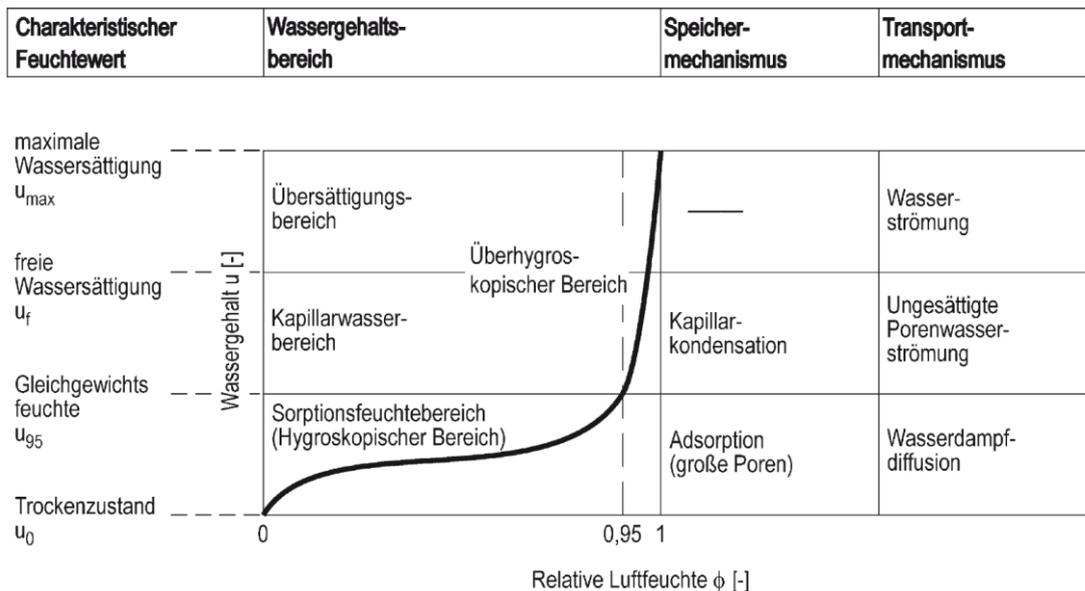


Abbildung 2.13: Wassergehaltsbereiche sowie Feuchtespeicher- und Transportmechanismen [Häu1].

Werden die beiden genannten Wassergehaltsbereiche zusammengeführt, entsteht die sogenannte Feuchtespeicherfunktion. Mit Hilfe der Feuchtespeicherfunktion kann für eine bestimmte Temperatur (i. d. R. 20 °C) und einer relativen Luftfeuchte die Ausgleichsfeuchte des Baustoffs abgeschätzt werden. Dabei sind der Verlauf und die Form der Feuchtespeicherfunktion für jeden Baustoff unterschiedlich. Des Weiteren erreichen verschiedene Baustoffe auch unterschiedliche Wassergehalte der freien Wassersättigung u_f . Für einen Zementestrich wird ein Feuchtegehalt von 8,1 – 8,3 M.-% für die freie Wassersättigung angegeben [Mos1].

Abbildung 2.14 zeigt den genannten Zusammenhang der klimatischen Umgebungsbedingungen und dem Wassergehalt eines Zementestrichs. Dabei entsteht abhängig von den Desorptions- oder Adsorptionsvorgängen eine Hysterese in der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe, welche auf unterschiedliche Wasserbindungsprozesse im Material zurückzuführen ist [Kru1]. Der Zementestrich gibt zu Beginn des Desorptionsprozesses das physikalisch schwach gebundene Wasser ab, erst danach wird das physikalisch stärker gebundene Wasser von den Porenoberflächen abgesondert. Bei der Adsorption werden dagegen die Wassermoleküle zu Beginn schwach gebunden und erst allmählich an die Porenoberflächen mit einer stärkeren Bindung angelagert. [Kru1], [Wit1]

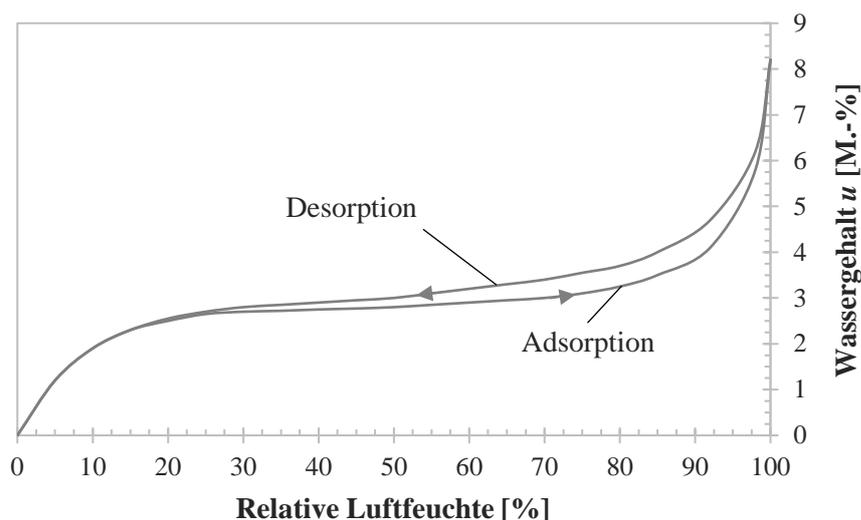


Abbildung 2.14: Feuchtespeicherfunktion von Zementestrich nach [Sch2].

Der charakteristische Wert des Feuchtegehaltes u wird massebezogen mit der folgenden Gleichung ermittelt:

$$u = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Trockenmasse des Baustoffs}} \cdot 100 \text{ in } \% \quad 2.15$$

Die Trockenmasse von zementgebundenen Baustoffen wird dabei mittels der Darr-Methode [DIN12570] bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C durch Trocknung bis zur Massekonstanz ermittelt.

2.3.2 Belegreife von Estrichen

Soll auf einen frisch verbauten Estrich ein Bodenbelag aufgebracht werden, so müssen spezifische Anforderungen an die Festigkeit und den Feuchtegehalt des Estrichs eingehalten werden. Hat der Estrich die Anforderungen erreicht, so ist er belegreif. Das maßgebende Kriterium zum Erreichen der Belegreife ist dabei der Feuchtegehalt des Estrichs [Sch2]. In den vorangegangenen Jahren wurden dafür allgemeingültige Grenzwerte der Restfeuchte für die Belegreife eingeführt. In der folgenden Tabelle 2.4 sind die aktuell gültigen Grenzwerte der Belegreife für Zementestrich und Calciumsulfatestrich, gemessen mit der Calciumcarbid-Methode (CM-Methode nach [DIN18560-1]), abhängig von der Nutzung des Estrichs (beheizter oder unbeheizter Estrich) angegeben.

Tabelle 2.4: Grenzwerte der Restfeuchte nach [DIN18560-1]⁶.

Estrichart	CM-%	
	unbeheizt	beheizt
Zementestrich	≤ 2,0	≤ 1,8
Calciumsulfatestrich	≤ 0,5	≤ 0,5

Der eingeführte Grenzwert stellt hierbei eine empirisch ermittelte Größe dar, welche einer stetigen Anpassung unterlag und einer Ausgleichsfeuchte bei einem Raumklima von ca. 20 °C und 60 % relativer Luftfeuchte entspricht. Des Weiteren gilt der Grenzwert auch nur für eine bestimmte Zusammensetzung des Estrichs. Variieren die Estrichzusammensetzungen oder weichen die klimatischen Raumbedingungen von den oben genannten ab, verändert sich die Ausgleichsfeuchte und somit der Grenzwert für die Belegreife des Estrichs.

Bei einem Estrich auf einer Trenn- oder Dämmschicht ist eine Austrocknung nur über die Oberfläche möglich, die Randbereiche und die Unterseite sind versiegelt, was die Einstellung der Ausgleichsfeuchte erheblich verzögert. Weiterhin können Feuchtegradienten innerhalb des Estrichs auftreten. In der DIN 18560-1 gibt es die Forderung, dass die Probennahme gleichmäßig verteilt über die gesamte Estrichhöhe vorgenommen werden soll. Es wird mit Hilfe der CM-Methode somit immer eine integrale Betrachtung der Feuchte über die gesamte Höhe, unabhängig von der Verlegeart des Estrichs, vorgenommen.

Ein Vergleich der Grenzwerte der CM-Methode für die Belegreife aus Tabelle 2.4 mit der Feuchtespeicherfunktion aus Abbildung 2.14 macht deutlich, dass bei einer relativen Luftfeuchte von 60 % kein Wassergehalt von 2,0 M.-%, sondern eine Feuchte von ca. 3,0 bis 3,5 M.-% abgelesen werden kann. Dies verdeutlicht, dass die CM-Feuchte nicht unmittelbar mit der Darr-Feuchte vergleichbar ist. Eine Vergleichbarkeit wäre erst nach einem deutlich längeren Messzeitraum der CM-Methode gegeben [WTA1], da im Messzeitraum der CM-Methode von ca. 10 Minuten nicht das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser, wie bei der Darr-Methode, erreicht wird. Somit ist die CM-Feuchte bei zementgebundenen Baustoffen immer ca. 1,0 bis 1,5 % geringer als die Darr-Feuchte [Sch2].

⁶ Stand: März 2019

2.3.3 Einfluss der Wasserbindung in zementgebundenen Baustoffen bei der Feuchtemessung mittels dielektrischer Verfahren

Die Wassermoleküle gehen während des Erhärtungsprozesses eine feste Bindung mit dem Zement ein, wobei dieser chemisch fest gebundene Wasseranteil für eine Polarisierung nicht zur Verfügung steht. Der Wert seiner relativen Permittivität entspricht dem trockener Baustoffe, er liegt bei etwa fünf [She1].

Das physikalisch gebundene Wasser wird während des Erhärtungsprozesses in mehreren Schichten an die Porenoberflächen des zementgebundenen Baustoffs angelagert. Dabei ist die Bindungskraft der Wassermoleküle der ersten Schicht auf der Porenoberfläche am größten und nimmt mit zunehmender Schichtenanzahl ab. [Käm1] und [McC1] untersuchten den Einfluss der Bindungskräfte des Wassermoleküls auf die dielektrischen Eigenschaften und stellten fest, dass eine einschichtige Belegung eines Materials keine Änderung in der relativen Permittivität zeigt. Die Bindung des Wassers sei in dieser Schicht zu stark, um die Moleküle polarisieren zu können [Mou1]. Erst bei Vorhandensein mehrerer Wassermolekülschichten konnte eine Änderung der relativen Permittivität festgestellt werden. Den Einfluss des physikalisch stark gebundenen Wassers auf die Änderung der relativen Permittivität eines Bentonits untersuchten [Bob1]. Sie arbeiteten einen Einfluss des physikalisch stark gebundenen Wassers auf die relative Permittivität des Materials bis zu einer Feuchte von ca. 1,5 bis 2,0 M.-% heraus.

Im Gesamten bedeutet dies für die Messung des Feuchtegehaltes mit Hilfe der Mikrowellentechnik, dass nur das freie und Teile des physikalisch gebundenen Wassers erfasst werden können. Im Vergleich zum gesamten physikalisch gebundenen Wasser kann der Anteil, welcher zur Polarisierung zur Verfügung steht nach [Bob1] somit um ca. 1,5 M.-% geringer sein. Diese Differenz im Feuchtegehalt entspricht dem im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Unterschied von CM- und Darr-Feuchte, sodass eine Ermittlung des Feuchtegehaltes in CM-% mit Hilfe des Mikrowellenverfahrens möglich wäre. Dieser mögliche Zusammenhang soll später noch näher betrachtet werden (siehe Abschnitt 4.2.4).

Die genannten Aspekte verdeutlichen aber auch, dass mit Hilfe der Messung der dielektrischen Eigenschaften zementgebundener Materialien Aussagen zur Stärke der Wasserbindung möglich sind. Besitzt der Baustoff eine geringe relative Permittivität, so können chemisch und physikalisch stark gebundene Wasseranteile im Baustoff vorhanden sein, welche nicht zu einer Änderung der dielektrischen Eigenschaften im Vergleich zum trockenen Baustoff führen. Bei einem Anstieg der relativen Permittivität ist freies und/oder physikalisch schwach gebundenes Wasser vorhanden, welches im Sinne der Belegreife relevant ist und eine schädigende Wirkung besitzen kann.

2.3.4 Stand der Forschung zur Untersuchung des Feuchtegehaltes mittels dielektrischer Verfahren

Neben der zerstörenden Feuchtemessung mit der Darr- oder CM-Methode kann der Feuchtegehalt von zementgebundenen Baustoffen auch mittels zerstörungsfreier Messverfahren ermittelt werden. Dazu können die dielektrischen Eigenschaften des Materials genutzt werden.

Bei der Untersuchung des Feuchtegehaltes mittels dielektrischer Verfahren werden die Messung der elektrischen Kapazität (kapazitive Messverfahren) und die Interaktion der Wassermoleküle in einem elektromagnetischen Feld (z. B. Mikrowellenverfahren) unterschieden. Als Messgröße dient den kapazitiven Messverfahren die Kapazität eines Kondensators, wohingegen die Mikrowellenmesstechnik die Durchlässigkeit des Materials gegenüber elektromagnetischer Felder nutzt (siehe Abschnitt 2.1). Die zerstörungsfreien Feuchtemessverfahren benötigen dabei eine Kalibrierung der Messwerte auf den jeweiligen Feuchtegehalt des Baustoffs [Sie1].

Im Folgenden sollen vorangegangene Arbeiten zu vergleichenden Untersuchungen von zerstörenden mit zerstörungsfreien Feuchtemessverfahren vorgestellt werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk bei der zerstörungsfreien Feuchtemessung auf den dielektrischen Verfahren.

[WTA1] sieht die zerstörungsfreien Messverfahren weniger als quantitative Methoden zur Bestimmung von absoluten Feuchtwerten, vielmehr sei derzeit eine qualitative Aussage möglich, wo es in den verlegten Estrichen zu Feuchteansammlungen gekommen ist. In ihren Untersuchungen arbeiteten sie Einflussgrößen zur Beurteilung der CM-Methode heraus und führten vergleichende Untersuchungen durch. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der CM-Methode genaue Ergebnisse erreicht werden können, diese aber von der subjektiven Erfahrung und der Kenntnis des Prüfers abhängig sind. Die aufgeführten Einflussfaktoren nach [WTA1] sind:

- *Einwaagemenge* - Je größer die Einwaagemenge für die Prüfung des Feuchtegehaltes ist, desto genauer das Messergebnis. Die Einwaagemenge ist jedoch abhängig von dem zu erwartenden Feuchtegehalt der Probe.
- *Grad der Zerkleinerung der Probe* - Beeinflussung des Messergebnisses, da bei zu grobem Prüfgut das Wasser weniger schnell für die Reaktion mit dem Calciumcarbid zur Verfügung steht.
- *Ablesezeitpunkt* - Abhängigkeit vom Größtkorn des Prüfgutes (Zementestrich oder Beton) und der Einwaagemenge.
- *Messprozedere* - Einhaltung des Vorgehens während der Messung.

Weitere zerstörungsfreie Untersuchungen mit der sogenannten Time Domain Reflectometry (TDR-Methode) machten KÖNIGER & SCHUMANN [Kön1]. Die TDR-Methode nutzt ebenfalls die dielektrischen Eigenschaften des Baustoffs, hierbei kann mit Hilfe von Reflexionen eines eingetragenen Impulses auf die Feuchte des Materials geschlossen werden. Der in [Kön1] genutzte Sensor muss dabei zur Untersuchung des Feuchtegehaltes an einer Stelle im Estrich eingebaut werden. Es müssten somit mehrere Sensoren genutzt werden, um das Trocknungsverhalten des gesamten Estrichs zu betrachten. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen zeigen eine hohe Übereinstimmung der TDR-Methode mit den gravimetrisch ermittelten Feuchten, wobei sie einen funktionellen Zusammenhang zwischen der Laufzeit des Impulses und dem Feuchtegehalt der Probe herausarbeiten konnten.

Vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen zerstörungsfreien Feuchtemessverfahren führten KRUSCHWITZ ET AL. [Kru2], [Kru3] durch. Neben den klassischen zerstörenden Messverfahren (Darr- und CM-Methode) kamen kapazitive Feuchtemessverfahren, ein Mikrowellenverfahren und die Nuclear Magnetic Resonance (NMR-Methode) zum Einsatz. Die NMR-Methode nutzt im Vergleich zum Mikrowellenverfahren nicht die Polarisierbarkeit, sondern das magnetische Moment der Wassermoleküle. Die Methode ist dabei hoch selektiv gegenüber Wassermolekülen, jedoch ist der technische Aufwand enorm, um einen Einsatz der NMR-Methode auf der Baustelle zu ermöglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen [Kru2], [Kru3] zeigen, dass es qualitativ mit allen Verfahren möglich ist, die Trocknung des Materials zu untersuchen. Für das Mikrowellenverfahren konnten sie für zwei Sensoren⁷ den Verlauf des Minimums der Resonanzkurve abbilden (Abbildung 2.15) und stellten fest, dass das Mikrowellenverfahren unterhalb eines Feuchtegehaltes von ca. 3,2 M.-% (Bezug Darr-Methode bei 105 °C) eine geringe Sensitivität gegenüber Feuchteänderungen besitzt. Gleichzeitig weisen sie darauf hin, dass die Darrung bei 105 °C möglicherweise keinen Bezug zur Schadensträchtigkeit des Estrichs besitzt [Kru2], da Anteile von physikalisch gebundenem Wasser im Estrich erreicht werden, die im Sinne der Belegreife unkritisch sind.

⁷ KRUSCHWITZ ET AL. nutzten in ihren Untersuchungen zwei Streufeld-Resonatoren (R1 und R2) mit unterschiedlichen Eindringtiefen von 10 bis 20 mm (R1) und 40 bis 50 mm (R2) (siehe Abschnitt 2.1.2) in den zu untersuchenden Estrich.

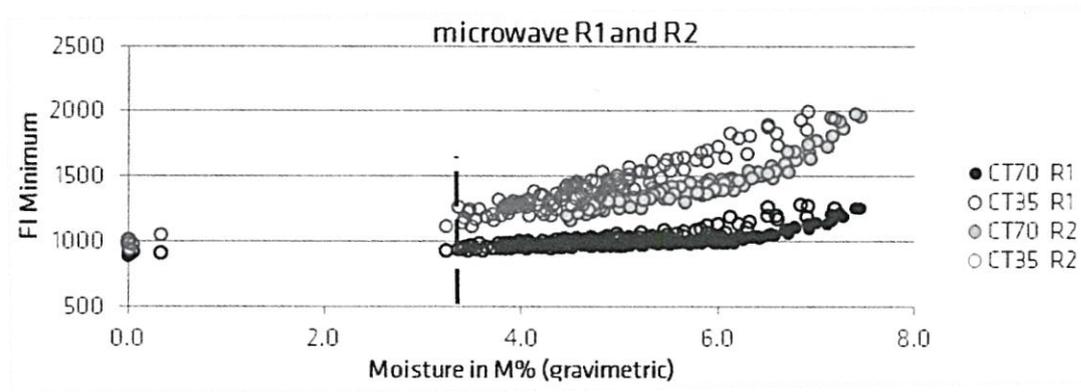


Abbildung 2.15: Originalansicht der Messergebnisse für die Mikrowellensensoren R1 und R2 und einer Estrichdicke von 35 und 70 mm, entnommen aus [Kru3].

2.4 Verfahren zur Messdatenanalyse

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, entsteht aus der schmalen Frequenzbandmessung der Sensoren eine Messkurve. Die Änderung der Messkurve während des Erhärtungs- oder Trocknungsprozesses kann auf verschiedene Arten untersucht werden, wobei festgelegte Kenngrößen auf der Messkurve (Parameter)⁸, mehrere Einzelparameter oder Parameterkombinationen analysiert werden können. Neben der Untersuchung der Parameter ist ebenfalls eine Auswertung der Änderung der Feuchteindizes des gesamten Frequenzbandes während der Prozesse möglich. Die Auswertung von mehreren Einzelparametern, Parameterkombinationen oder der Änderung der Feuchteindizes des Frequenzbandes stellt dabei eine multivariate Datenanalyse dar.

Um die Messdaten der Mikrowellentechnik mit einer bestimmten Eigenschaft des Materials, wie zum Beispiel dem Feuchtegehalt eines zementgebundenen Baustoffs, zu verknüpfen, werden Referenzwerte benötigt. Die Verknüpfung der Messdaten mit den Referenzwerten erfolgt mit Hilfe von Berechnungsmodellen, welche aus der Datenanalyse mit anschließender Regression gewonnen werden.

Im folgenden Abschnitt soll die Erstellung von Berechnungsmodellen aus einparametrischen Verfahren sowie der multivariaten Datenanalyse näher erläutert werden.

2.4.1 Einparametrische Verfahren

Die einparametrische Auswertung von Messsignalen ist im Bauwesen die gängigste Methode zur Verknüpfung von Messdaten mit den Referenzwerten. Dabei erfolgt eine Analyse der Messdaten für einen definierten Parameter und es wird über die Änderung des gewählten Parameters in Abhängigkeit zum Referenzwert auf die Änderung der Eigenschaft des Materials geschlossen.

In Abbildung 2.16 a) ist ein Beispiel von gemessenen Daten der Mikrowellentechnik dargestellt⁹, wobei über einen Zeitraum von 7 Tagen der Trocknungsprozess eines Baustoffs untersucht und die Feuchteindizes im Scheitelpunkt der Resonanzkurve bestimmt wurden (siehe hierzu Abschnitt 2.1.2). Mit Bezug zum Referenzwert erfolgt eine Verknüpfung der Messdaten mit der jeweiligen Feuchte des Materials (Abbildung 2.16 b)). Für Teile oder die gesamte Verknüpfung ist es weiterhin möglich, einen funktionellen Zusammenhang der Messwerte mit den Referenzwerten und somit ein Berechnungsmodell (Kalibriermodell) herauszuarbeiten.

⁸ Die Erläuterung der in den eigenen Untersuchungen genutzten Parameter erfolgt in Abschnitt 3.3.1.

⁹ Die Daten der Mikrowellentechnik stellen vom Autor ermittelte Messwerte dar.

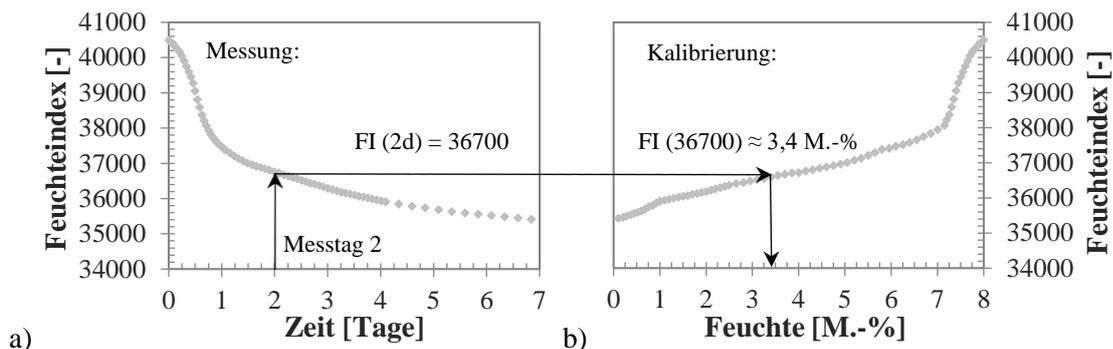


Abbildung 2.16: Beispiel von gemessenen Daten a) und einer Kalibrierung b) mit Hilfe der Referenzfeuchte.

2.4.2 Multivariate Datenanalyse

Die multivariate Datenanalyse nutzt mehrere Parameter, Parameterkombinationen oder das gesamte Frequenzband zur Auswertung der Messsignale. Dies erfolgt durch eine Kombination der Einzelparameter (Multiple lineare Regression MLR) oder mit Hilfe von Verfahren, welche die Messdaten komprimieren. Ein Verfahren, mit dessen Hilfe eine Komprimierung der Messdaten vorgenommen werden kann, ist die Hauptkomponentenanalyse.

Mit Hilfe von Regressionsverfahren, wie der Hauptkomponentenregression (Principal Component Regression PCR) oder der Partial Least Squares Regression (PLSR) ist eine Verknüpfung der komprimierten Messdaten mit den Referenzwerten möglich.

Das Ziel der multivariaten Datenanalyse ist es, die gemessenen Datensätze so zu reduzieren oder zu verdichten, dass die relevanten Informationen hervorgehoben werden, ohne die Datensätze zu verändern [Kes1].

Die Hauptkomponentenanalyse und die genannten Regressionsverfahren werden im nächsten Abschnitt vertieft dargestellt. Die grundlegenden Aussagen wurden dabei aus den Arbeiten von KESSLER [Kes1], RONNIGER [Ron1], BAMBERG ET AL. [Bam1], HOLTSMANN [Hol1], WENTURA [Wen1] sowie ROESSLER [Roe1] und PRINCZ [Pri1] entnommen.

Das Prinzip der Hauptkomponentenanalyse besteht darin, aus den Ausgangsdaten (Parameter $x_1 \dots x_n$) die größte Änderung eines Messparameters (Varianz) zu ermitteln und die Messdaten in der Reihenfolge ihrer größten Änderung auf die Achsen $PC_1 \dots PC_n$ eines neuen Koordinatensystems zu transformieren (Abbildung 2.17). Dieses neue Koordinatensystem beschreibt die Ausgangsdaten besser, sodass eine Datenreduktion möglich ist. Dabei werden relevante von nicht relevanten Informationen getrennt und eventuell auftretendes Rauschen im Messsignal entfernt [Kes1].

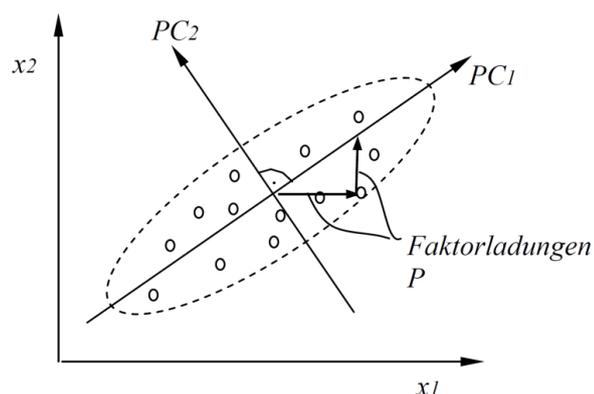


Abbildung 2.17: Prinzip der Hauptkomponentenanalyse [Ron1].

Eine Transformation der Messdaten in ein neues Koordinatensystem stellt, mathematisch betrachtet, ein Eigenwertproblem dar. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wird versucht, die Lösung dieses Eigenwertproblems zu finden, wobei die Ausgangsdaten in sogenannte Faktorenladungen, Faktorenwerte und Residuen zerlegt werden (Abbildung 2.18). Die Faktorenladungen sind die Wegbeschreibung, mit der die Messwerte in das neue Koordinatensystem überführt werden. Sie geben an, wie die neuen Achsen im ursprünglichen Koordinatensystem liegen. Die Projektion von jedem einzelnen Datenpunkt auf das neue Koordinatensystem, wird dagegen mit den Faktorenwerten ermittelt. Die Residuen stellen im Wesentlichen nur den Messfehler oder das Rauschen im Messsignal dar.

Zur Ermittlung der Faktorenladungen und Faktorenwerte wird zu Beginn die Datenmatrix X standardisiert und mittenzentriert. Zur Mittenzentrierung wird der Ursprung des neuen Koordinatensystems in den Schwerpunkt aller Messdaten gelegt. Die Messdaten können dabei unterschiedliche absolute Werte annehmen, was zur Folge hat, dass die größten Absolutwerte als erste Hauptkomponente bestimmt werden. Um dies zu umgehen, ist es sinnvoll, die Ausgangsdaten zu standardisieren und somit die Varianzen in den Daten zu vereinheitlichen.

Zur Standardisierung und Mittenzentrierung der Messdaten werden für jede Variable der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Es folgt die Mittenzentrierung, indem von dem Ausgangsparameter X_A die Mittelwerte X_M subtrahiert werden. Danach wird durch die Standardabweichung S dividiert und somit die Messdaten standardisiert. Die Gleichung lautet somit:

$$X = \frac{X_A - X_M}{S} \quad 2.16$$

Die Datenmatrix X wird im Weiteren in zwei Matrizen T (Gewichtsmatrix) und P (Faktorenmatrix) zerlegt (Abbildung 2.18), wobei T und P die Ausgangsmatrix reproduzieren können. Die Residuenmatrix E steht für die Differenz zwischen dem Produkt TP^T und der Datenmatrix X . Damit kann die folgende Gleichung zur mathematischen Beschreibung der Hauptkomponentenanalyse aufgestellt werden:

$$X = TP^T + E \quad 2.17$$

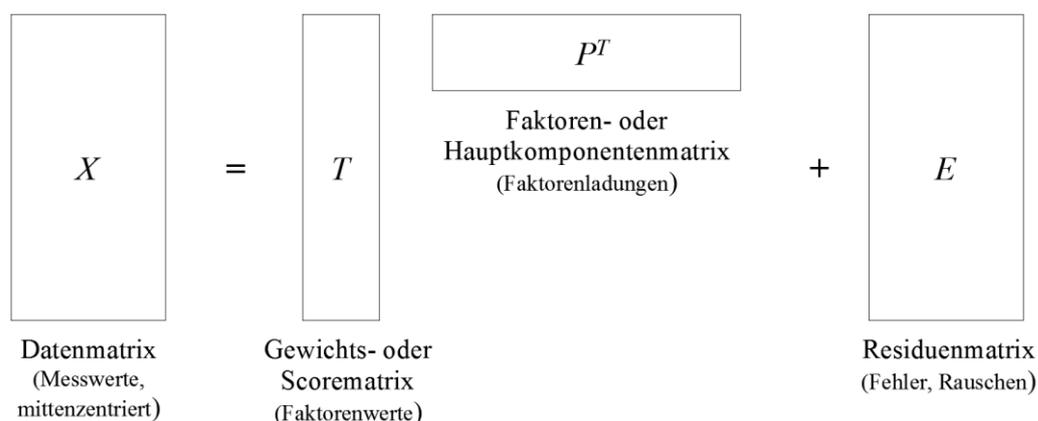


Abbildung 2.18: Modell zur Hauptkomponentenanalyse nach [Kes1].

Wie oben erwähnt, wird zur Ermittlung der Ausrichtung des neuen Koordinatensystems die größte Varianz einer Messvariablen genutzt. Dabei wird die neue PC_1 -Achse in Richtung der maximalen Varianz gedreht. Die Ausrichtung der PC_2 -Achse erfolgt in Richtung der zweitgrößten Varianz, jede weitere Achse folgt analog. Bedingung ist, dass die Achsen orthogonal aufeinander stehen müssen.

Zur Überführung der Messdaten in das neue Koordinatensystem werden die Faktorenwerte genutzt, welche unter Anwendung der Faktorenladungen auf jede Variable der Messdaten ermittelt werden. Die Darstellung der Faktorenwerte erfolgt für jede Hauptkomponentenachse üblicherweise in einem Scoreplot (Abbildung 2.19).

Das so neu entstehende Koordinatensystem ist eine Projektion der Ursprungsdaten, wobei keine Informationen verloren gehen, sie werden lediglich reduziert oder verdichtet.

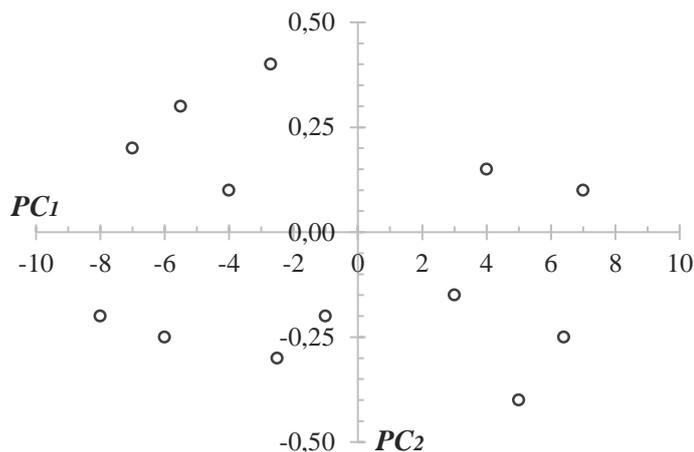


Abbildung 2.19: Projektion der Datenpunkte in das neue Koordinatensystem (Faktorenwerte).

2.4.3 Aufstellung von Berechnungsmodellen

Zur Verknüpfung der Messdaten mit einer bestimmten Eigenschaft des zu untersuchenden Materials werden Referenzwerte benötigt, welche zum Beispiel die Druckfestigkeit oder der Feuchtegehalt von zementgebundenen Baustoffen sein können. Im Allgemeinen wird nach einem funktionalen Zusammenhang der Messdaten mit den Referenzwerten gesucht. Dazu werden Regressionsverfahren unter Nutzung der Ausgangsdaten (MLR) oder der komprimierten Daten aus der Hauptkomponentenanalyse (PCR und PLSR) eingesetzt. Mit Hilfe eines aus der Regression gewonnenen Berechnungsmodells, kann die Verknüpfung der Messdaten mit den Referenzwerten erfolgen.

Im Folgenden sollen die Regressionsverfahren MLR, PCR und PLSR kurz vorgestellt werden. Auf eine detaillierte Darstellung der Regressionsverfahren wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Arbeiten von [Kes1], [Hol1] und [Wen1] verwiesen.

Die *Multiple Linear Regression* (MLR) sucht im Allgemeinen nach Zusammenhängen zwischen einem abhängigen Wert \hat{y} (berechneter Wert) und mehreren unabhängigen Einzelparametern x (Messparameter). Dabei wird der Wert \hat{y} mit einer linearen Kombination der Parameter berechnet (Gleichung 2.18), was bedeutet, dass jeder Einzelparameter mit einem Betrag $b_{1...n}$ multipliziert wird. Dabei wird ein Absolutglied b_0 und ein Fehler e in die Gleichung aufgenommen.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n + e \quad 2.18$$

Bei der *Hauptkomponentenregression* (PCR) erfolgt eine Verknüpfung der Hauptkomponentenanalyse mit der MLR. Im Gegensatz zur MLR wird jedoch die Berechnung des abhängigen Wertes \hat{y} mit den Faktorenwerten der Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, wobei nur die Hauptkomponenten mit der größten Varianz in den Ausgangsdaten genutzt werden. Parameter mit geringer Varianz bleiben unberücksichtigt. Problem der Hauptkomponentenregression ist, die geeignete Anzahl an Hauptkomponenten festzulegen, welche das genaueste Berechnungsmodell liefert. Analog zur MLR werden die Regressionskoeffizienten B_0 bis B_n bestimmt und somit ein funktionaler Zusammenhang hergestellt (Gleichung 2.19).

$$\hat{y} = X_H B + F \quad 2.19$$

In der komprimierten Datenmatrix X_H aus der Hauptkomponentenanalyse stehen dabei nur die Faktorenwerte. Damit gibt es auch nur so viele Regressionskoeffizienten $B_{1..n}$, wie es Faktorenwerte gibt. Über den Kalibrierfehler des Modells, gibt die Fehlermatrix F Auskunft. Ziel der PCR ist es, das genaueste Berechnungsmodell in Abhängigkeit der verwendeten Hauptkomponenten zu finden.

Die *Partial Least Squares Regression* (PLSR) nutzt ebenfalls die Faktorenwerte aus der Hauptkomponentenanalyse, um einen Zusammenhang der Messdaten mit den Referenzwerten zu finden. Im Gegensatz zur PCR verwendet die PLSR aber nicht nur die komprimierten Messdaten, sondern integriert die Referenzwerte in die Bestimmung der Hauptkomponenten. Die Hauptkomponentenanalyse der Einzelparameter liefert Informationen für die Hauptkomponentenanalyse der Referenzwerte, wobei erreicht wird, dass weniger Hauptkomponenten zur Erstellung der Berechnungsmodelle benötigt werden. Die folgende Abbildung soll schematisch den Aufbau der PLSR verdeutlichen:

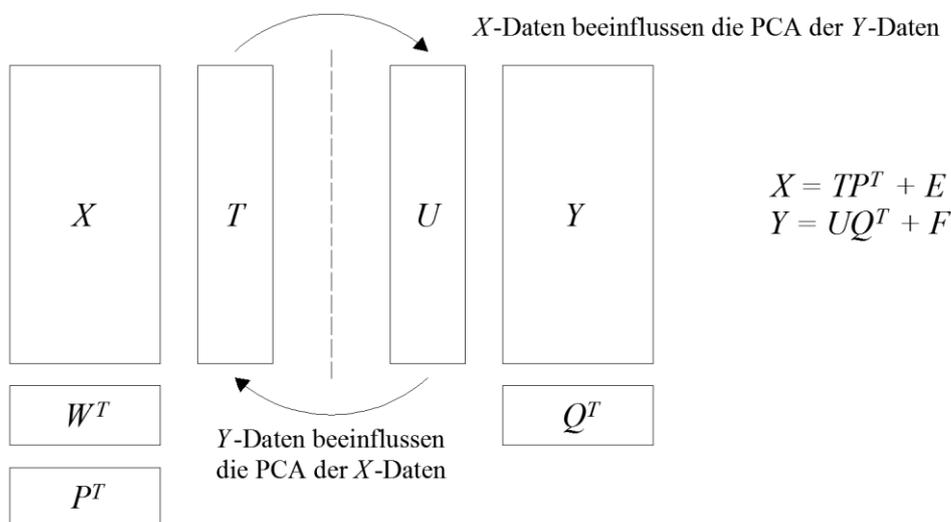


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung der PLSR nach [Kes1].

Um eine höhere mathematische Sicherheit bei der Aufstellung von Berechnungsmodellen mit den genannten Regressionsverfahren zu erhalten, kann eine Kreuzvalidierung durchgeführt werden. Dazu wird der komplette Datensatz in einen Kalibrier- und einen Validiersatz zerlegt. Um das optimale Berechnungsmodell für den gesamten Datensatz zu ermitteln, wird dieser Schritt bei den einzelnen Verfahren mehrfach durchgeführt.

Vorteil dieser Methode ist zum einen die Verringerung der Anzahl der möglichen Kombinationen der Einzelparameter und zum anderen kann so sichergestellt werden, dass Messdaten aus allen Bereichen der Referenzwerte in das Berechnungsmodell einfließen. Zur Auswahl des optimalen Modells wird jede Berechnung hinsichtlich ihrer Fehlergrößen bewertet, dazu wird das Berechnungsmodell sowohl auf den Validierdatensatz als auch auf den gesamten Datensatz angewendet.

2.4.4 Fehlergrößen zur Bewertung der Genauigkeit von Berechnungsmodellen

Die Genauigkeit der aus den vorgestellten Regressionen gewonnenen Berechnungsmodelle, wird über einen Vergleich der berechneten Werte mit den Referenzwerten ermittelt. Dabei werden bestimmte Fehlergrößen, wie der mittlere quadratische Fehler, der maximale absolute Fehler und das Bestimmtheitsmaß zur Beurteilung der Modelle genutzt. Diese Fehlergrößen sollen im Folgenden näher erläutert werden.

Der *mittlere quadratische Fehler* (Root Mean Square Error *RMSE*) gibt an, um wieviel im Mittel die berechneten Werte des Modells von den Referenzwerten abweichen. Die Referenzwerte können dabei unterschiedliche Größenordnungen annehmen, somit hat eine Interpretation des RMSE immer in Relation mit den Referenzwerten zu erfolgen.

Bei der Berechnung des *RMSE* wird im Zähler die Summe der Fehlerquadrate aus den berechneten Werten \hat{y}_i und den Referenzwerten y_i bestimmt. Danach folgt eine Berechnung der Restvarianz, indem die Summe der Fehlerquadrate durch die Probenanzahl n geteilt wird. Die Wurzel aus der Restvarianz ergibt den mittleren quadratischen Fehler *RMSE* (Gleichung 2.20).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad 2.20$$

Der *maximale absolute Fehler* ($\max. \Delta y$) bezeichnet die maximale Differenz zwischen den berechneten Werten \hat{y}_i und den Referenzwerten y_i . Er gibt also an, wie groß die maximale Abweichung eines Einzelwertes von der Berechnung ist. Er ist wie der *RMSE* ein Maß für die Genauigkeit eines Berechnungsmodells. Berechnet wird der maximale absolute Fehler mit der folgenden Gleichung:

$$\max. \Delta y = \max. |y_i - \hat{y}_i| \quad 2.21$$

Um neben den Fehlerangaben auch Aussagen zum Zusammenhang zwischen den berechneten Werten \hat{y}_i und den Referenzwerten y_i zur erhalten, wird das *Bestimmtheitsmaß* r^2 genutzt. Das Bestimmtheitsmaß drückt dabei den Anteil, der durch die unabhängige Variable x erklärten Varianz, an der gesamten Varianz der abhängigen Variablen y aus. Berechnet wird das Bestimmtheitsmaß mit der Gleichung 2.22.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad 2.22$$

2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung für die eigenen Untersuchungen

Die Mikrowellenmesstechnik erfasst in zementgebundenen Baustoffen nur das freie und Teile des physikalisch gebundenen Wassers, das chemisch gebundene Wasser kann von den elektromagnetischen Wellen nicht polarisiert werden. Der Reflektionsfaktor und somit der Feuchteindex der Mikrowellenmesstechnik ist demnach ein Ausdruck, wieviel Feuchte physikalisch schwach gebunden oder ungebunden im Baustoff vorliegt. Dies lässt einen direkten Bezug zum chemischen Wasserbindungsprozess (Hydratationsprozess) von Beton zu. Des Weiteren können Aussagen zur Restfeuchte (schwach gebundenes oder ungebundenes Wasser) in Zementestrichen getroffen werden.

Der Hydratationsprozess ist eine komplexe chemische Reaktion, bestehend aus Strukturbildung und einer gleichzeitigen Wasserbindung, wobei beide Prozesse bei einer Untersuchung mit Hilfe der Mikrowellentechnik sichtbar werden. Die vorangegangenen Arbeiten zur Untersuchung der Erhärtung von zementgebundenen Baustoffen mittels Mikrowellentechnik zeigten, dass der Erhärtungsprozess abgebildet werden kann und dass ein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und den dielektrischen Eigenschaften des Materials existiert. Die Änderung der dielektrischen Eigenschaften während des Hydratationsprozesses zeigt dabei einen S-förmigen Kurvenverlauf, welcher auch bei der Entwicklung der Eigenschaften, insbesondere bei der Druckfestigkeitsentwicklung bekannt ist. Eine breite Anwendung der Mikrowellentechnik auf Betone verschiedener Zusammensetzung erfolgte bislang nicht und es konnte somit noch nicht geklärt werden, inwieweit verschiedene Zementarten und Betonzusätze Einfluss auf die Änderung der dielektrischen Eigenschaften von zementgebundenen Baustoffen besitzen. Dabei wurden die vorangegangenen Untersuchungen anderer Autoren mit unterschiedlicher Sensortechnik durchgeführt, gleichzeitig erfolgte die Auswertung der Untersuchung über verschiedene Messwerte oder Parameter.

Die genannten Thematiken sollen in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen werden (siehe Kapitel 3), dabei soll eine Untersuchung des Erhärtungsprozesses von Betonen mit unterschiedlicher Zusammensetzung erfolgen. In den Untersuchungen werden dabei drei Mikrowellensensoren mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt, wobei die Sensoren in einem schmalen Frequenzband den Erhärtungsprozess erfassen. Aufgrund der Komplexität des Hydratationsprozesses werden verschiedene Verfahren zur Auswertung der Änderung des Frequenzbandes und neben einer einfachen einparametrischen Auswertung auch eine multivariate Datenanalyse genutzt. Dabei werden verschiedene Parameter, wie die Wendepunkte oder das Minimum, auf dem

Frequenzband definiert und nach einem Zusammenhang mit der Druckfestigkeit des Betons ausgewertet. Ziel ist es, eine adäquate Kombination aus Sensor und Auswerteverfahren zu erarbeiten, um ein Berechnungsmodell aufstellen zu können, welches den Erhärtungsprozess von Beton anhand der Druckfestigkeitsentwicklung abbilden kann. Gleichzeitig sollen aus den Untersuchungen des Erhärtungsprozesses Einflüsse auf den kombinierten Prozess aus Erhärtung und Trocknung abgeleitet werden.

Der kombinierte Prozess aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe und somit eine Untersuchung des Feuchtegehaltes eines Zementestrichs bis zur Belegreife wird derzeit mit zerstörenden Messverfahren durchgeführt. Die CM-Methode ist zur Ermittlung der Restfeuchte das genormte Verfahren. Für die Restfeuchte in Estrichen werden konkrete Feuchten angegeben, dennoch treten auch bei eingehaltener maximaler Restfeuchte Schäden auf. Die Untersuchung eines Zementestrichs bis zur Belegreife erfolgt dabei immer bei einem kombinierten Prozess aus Erhärtung und Trocknung, wobei der Estrich das Wasser chemisch bindet, gleichzeitig entweicht infolge der Trocknung Feuchte aus dem Material. Aus der Auswertung vorangegangener Arbeiten wurde deutlich, dass der Trocknungsprozess mit Hilfe dielektrischer Verfahren prinzipiell abgebildet werden kann, es aber Probleme bei der Bestimmung der Feuchtegehalte mit der Mikrowellentechnik unterhalb von ca. 3,2 M.-% gibt. Gleichzeitig werden den Zementestrichen in der Praxis vermehrt Zusatzstoffe und –mittel beigefügt, welche die Wasserbindungsprozesse beeinflussen. Der Bezug der Messwerte der Mikrowellentechnik erfolgte dabei stets auf die Feuchtegehalte der Darr-Methode bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C, obwohl dabei Wasseranteile erfasst werden, welche möglicherweise nicht schadensträchtig sind [Kru2].

Diese Aspekte sollen in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen werden (siehe Kapitel 4), wobei ein einparametrisches Verfahren zur Messdatenanalyse genutzt werden soll, um die Prozesse aus Erhärtung und Trocknung abbilden zu können. Aus den Untersuchungen sollen Einflüsse aus der Hydratation des Zementes und Zusammenhänge der Feuchtegehalte bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen der Darr-Methode und der Mikrowellendaten herausgearbeitet werden. Dabei dient die Mikrowellentechnik aufgrund der Messung von nur freiem und physikalisch schwach gebundenem Wasser zur Detektion von kritischen bzw. unkritischen Wasseranteilen im Zementestrich. Ziel ist es, ein Berechnungsmodell zur Bestimmung des Feuchtegehaltes mit Hilfe der Mikrowellentechnik aufzustellen. Dabei werden die mit der Mikrowellentechnik ermittelten Feuchtegehalte mit den Werten der standardisierten Verfahren, wie der Darr- und CM-Methode, verglichen.

3 Untersuchung des Erhärtungsprozesses

Im Folgenden werden die Untersuchungen des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe vorgestellt. Dabei gliedert sich das Kapitel in die Versuchsdurchführung, die Auswertung sowie Diskussion der Untersuchungen und die Aufstellung und Anwendung von Berechnungsmodellen. Neben der Untersuchung des Erhärtungsprozesses werden Einflüsse der Sensor- bzw. Materialtemperatur auf die Mikrowellentechnik untersucht. Für diese Einflüsse sollen, wenn nötig, geeignete Kompensationsmaßnahmen für die Untersuchungen erarbeitet werden.

3.1 Vorüberlegungen

Der Erhärtungsprozess zementgebundener Baustoffe lässt sich an einer Vielzahl von Betonzusammensetzungen untersuchen. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen konzentrierten sich auf die im Bauwesen gängigsten Variationen der Hauptbestandteile Zement, Wasser und Gesteinskörnung. Dabei sollten bei der Variation der w/z-Werte unterschiedliche Druckfestigkeitsentwicklungen untersucht werden. Gleichzeitig wurden verschiedene Zementarten, wie Portlandzement (CEM I), Portlandkompositzement (CEM II) und Hochofenzement (CEM III) genutzt und es erfolgte eine Variation der Zementmenge im Beton, mit dem Ziel, Einflüsse unterschiedlicher Hauptbestandteile und Mengenteile auf das Mikrowellenverfahren zu untersuchen.

Dem Beton können neben den Hauptbestandteilen auch Zusätze hinzugefügt werden, welche Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit des Betons oder die späteren Festbetoneigenschaften besitzen. Zur Untersuchung des Einflusses von solchen Zusätzen auf das Mikrowellenverfahren, wurden die Zusatzmittel Fließmittel (FM) und Luftporenbildner (LP) gewählt. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass Zusatzmittel untersucht werden sollten, welche entweder einen direkten Einfluss (LP) oder keinen Einfluss (FM) auf die Druckfestigkeitsentwicklung des Betons besitzen.

3.2 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

3.2.1 Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton

Zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe wurden insgesamt 24 Versuchsreihen durchgeführt. Neben der Variation des w/z-Wertes und dem Einsatz von Zusatzmitteln erfolgten Untersuchungen von verschiedenen Zementarten und unterschiedliche Zementmengen im Beton. Dabei wurden für jede Versuchsreihe zusätzliche Probekörper angefertigt, welche zur Ermittlung des Referenzwertes (Druckfestigkeit) dienen. Der Druckfestigkeitsverlauf ist dabei an insgesamt 9 Messtagen

ermittelt worden. Die Anzahl der Mikrowellenmessungen konnte deutlich höher gewählt werden, es wurden ca. 67 Einzelmessungen für eine Versuchsreihe in dem gewählten Messzeitraum von 7 Tagen durchgeführt. Eine Übersicht des Versuchsprogramms zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses mit dem Versuchsaufbau sowie der Sensortechnik, der Probekörpergeometrie, der Anzahl der Versuchsreihen und dem Referenzwert kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Erhärtungsprozesses.

Versuche	Variation		Versuchsaufbau	Probekörpergröße	Anzahl Versuchsreihen	Referenzwert
Erhärtungsprozess	w/z-Wert	0,45	Kontinuierliche Mikrowellenmessung Sensoren R2P, PP & Koax	200 · 200 · 200 mm ³	3	Druckfestigkeit
		0,50			3	
		0,55			3	
	Zementart	CEM II			2	
		CEM III			2	
	Zementmenge	360			3	
		440			2	
	Zusatzmittel	FM			2	
		LP			4	

Verwendetes Material

Die Untersuchung des Erhärtungsprozesses wurde an verschiedenen Betonzusammensetzungen durchgeführt. In Tabelle 3.2 sind die Bezeichnungen der Versuchsreihen mit der jeweiligen Zementart und den Mengenanteilen der Betonmischung sowie der Zusätze angegeben. Die eingesetzten Zemente unterscheiden sich dabei in ihren Festigkeitsklassen, wobei sie verschiedene Mahlfeinheiten und auch unterschiedliche Festigkeitsentwicklungen (N- und R-Zemente) aufweisen.

Der Portlandzement (CEM I) und der Hochofenzement (CEM III) sind Zemente der Firma Schwenk, der Portlandkompositzement (CEM II) stammt vom Zementhersteller Lafarge. Das eingesetzte Fließmittel MasterGlenium Sky 501 und der Luftporenbildner MasterAir 125 sind Produkte der Firma BASF.

Tabelle 3.2: Verwendete Betonzusammensetzungen.

Bezeichnung	Zement		Wasser	Gesteinskörnung (A/B 16)	Fließmittel	Luftporenbildner
	Art	Menge				
		kg/m ³			% vom Zement	
045	CEM I 42,5 R	400	180	1738	/	/
050	CEM I 42,5 R		200		/	/
055	CEM I 42,5 R		220		/	/
CEM II	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R		200		/	/
CEM III	CEM III/A 42,5 N-NA		200		/	/
360	CEM I 42,5 R	360	180	1825	/	/
440	CEM I 42,5 R	440	220	1651	/	/
FM	CEM I 42,5 R	400	180	1738	0,5	/
LP 1/2	CEM I 42,5 R		200		/	0,6
LP 3/4	CEM I 42,5 R		200		/	1,0

Sensortechnik und Versuchsaufbau

Für die kontinuierliche Mikrowellenuntersuchung wurde eine Versuchsanordnung aus Polyvinylchlorid (PVC) mit den Innenabmessungen von 200 · 200 · 200 mm³ entwickelt (Abbildung 3.1). In Kombination mit einer Abdeckung aus Polymethylmethacrylat (Acrylglas) und einem Dichtband, ermöglicht die Apparatur eine hygriech versiegelte Untersuchung des Betons während des Erhärtungsprozesses.

Die Mikrowellenuntersuchung erfolgte dabei mit Hilfe von unterschiedlichen Sensoren, welche von der hf-sensor GmbH bereitgestellt wurden. Aufgrund der Komplexität des Erhärtungsprozesses von Beton wurden für die Untersuchungen Sensoren mit einer hohen Messdatenauflösung genutzt. Zur Anwendung kamen ein offener Streufeld-Resonator (R2P), eine Patch-Antenne (PP) und ein Koax-Sensor (siehe Abschnitt 2.1.2).

Insgesamt wurden drei Versuchsanordnungen gefertigt, bei welchen die Sensoren seitlich appliziert werden, wobei zur Kopplung der Mikrowellensensoren an den Beton ein Flansch genutzt wird. Parallel zur Mikrowellenuntersuchung wird die Material- und die Sensortemperatur messtechnisch erfasst.

Die Sensoren werden dabei mit Hilfe eines Messrechners gesteuert. So kann das Messintervall beliebig gewählt werden und es erfolgt eine automatische Aufzeichnung der Messdaten. Das Programm MOIST-Tools der Firma hf-sensor GmbH diente dabei zur Steuerung der Sensoren, wobei die Messdaten der Mikrowellen- und der Temperatur-

messungen im XML-Format (Extensible Markup Language) aufgezeichnet werden. Dies ermöglicht es, die Messdaten rechnerbasiert mit dem einparametrischen Verfahren bzw. der multivariaten Datenanalyse auszuwerten.

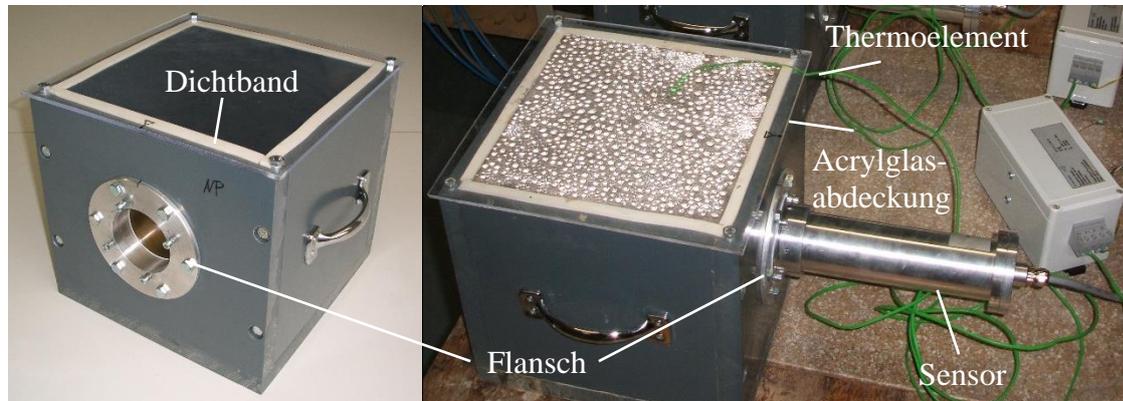


Abbildung 3.1: Versuchsapparatur und Applikation der Sensortechnik.

Ablauf der Untersuchungen

Die Untersuchungen des Erhärtungsprozesses von Beton wurden in einem Klimaraum, bei einer konstanten Temperatur von 20 ± 2 °C und unter hygrisch versiegelten Bedingungen durchgeführt. Hierbei kam die oben vorgestellte Versuchsapparatur zum Einsatz. Die Probekörper zur Ermittlung der Referenzdruckfestigkeit wurden versiegelt und bei der gleichen Temperatur im Klimaraum gelagert. Dabei erfolgte vor und nach der Versiegelung die Ermittlung der Masse der Probekörper. Mit diesem Vorgehen konnte sichergestellt werden, dass die Probekörper während des Erhärtungsprozesses keine Feuchte verlieren und somit ebenfalls unter versiegelten Bedingungen erhärteten.

Die oben genannten Betonzusammensetzungen für die unterschiedlichen Versuchsreihen wurden alle nach einem einheitlichen Vorgehen hergestellt. Während der Herstellung der Probekörper erfolgte die Bestimmung der Frischbetoneigenschaften, wie der Konsistenz, des Luftporengehaltes und der Frischbetonrohichte. Die ermittelten Frischbetoneigenschaften dienen im Weiteren dazu, mögliche Einflüsse auf das Mikrowellensignal sowie die Druckfestigkeit ableiten zu können.

Parallel zur Herstellung des Probematerials für die Mikrowellenuntersuchung wurden die Probekörper zur Ermittlung der Referenzdruckfestigkeit nach [DIN12390-3] hergestellt. Dazu wurden für jede Versuchsreihe 27 Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm gefertigt. An diesen Würfeln erfolgte die Druckfestigkeitsermittlung am vorgesehenen Prüftag, wobei an einem Prüftag die Druckfestigkeit von insgesamt 3 Probekörpern ermittelt wurde (siehe Tabelle 3.3).

Das Herstellen des Probematerials lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Einwaage der Ausgangsstoffe Zement, Wasser, Gesteinskörnung (Fraktionen 0/2, 2/8 und 8/16) und möglicher Zusätze
- Mischen der Ausgangsstoffe in einem Zwangsmischer für 90 Sekunden
- Bestimmung der Frischbetoneigenschaften (Konsistenz, LP-Gehalt und Frischbetonrohddichte)
- Erneutes Mischen der Ausgangsstoffe im Zwangsmischer für 90 Sekunden
- Einfüllen des Betons in die Versuchsanordnung
- Verdichtung des Betons auf einem Rütteltisch bis sichtbar keine Luft mehr entweicht (ca. 60 Sekunden)
- Einbau des Thermoelementes zur Messung der Betontemperatur
- Versiegelung der Probe mit der Acrylglasplatte
- Seitlicher Anbau des Sensors und Start der Mikrowellen- sowie Temperaturmessung

Die Untersuchung des Erhärtungsprozesses von Beton erfolgte in einem angepassten Intervall, wobei einerseits die Druckfestigkeitsermittlung und andererseits die Mikrowellenmessung an den Fortschritt des Erhärtungsprozesses angepasst worden sind. In Tabelle 3.3 sind beispielhaft die Messtage zur Ermittlung des Druckfestigkeitsverlaufes sowie die Anpassung der Intervalle bei der Mikrowellenmessung für eine Versuchsreihe dargestellt. Bei einigen Versuchsreihen kam es zu Abweichungen von der geplanten Abfolge, jedoch konnten keine Einflüsse auf die Ergebnisse der Untersuchungen festgestellt werden.

Tabelle 3.3: Beispiel der Aufteilung der Messtage bei der Ermittlung des Druckfestigkeitsverlaufes und Intervall der Mikrowellenmessung.

Druckfestigkeitsermittlung		Mikrowellenmessung	
Prüftag	Probekörperanzahl	Zeitraum	Intervall [h]
1.	3 pro Prüftag	0 – 24 h	1
2.		24 – 72 h	2
3.		72 – 168 h	6
5.		Σ 67	
7.			
9.			
14.			
21.			
28.			

Σ 27

Im Gesamten stehen zur Ermittlung des Druckfestigkeitsverlaufes 9 Messwerte, bestehend aus den Mittelwerten der 3 Proben für einen Messtag, für die Druckfestigkeit und ca. 67 Mikrowellenmessungen für eine Versuchsreihe zur weiteren Verarbeitung bereit.

Zur Verknüpfung der Druckfestigkeiten mit den Werten der Mikrowellenmessung erfolgte in einem ersten Schritt eine Regression des Druckfestigkeitsverlaufes. Dazu wurde der in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte funktionelle Zusammenhang der Gleichung 2.14 genutzt. Mit der Kenntnis der Funktion für die jeweilige Versuchsreihe, konnte jedem Mikrowellenmesswert eine konkrete Druckfestigkeit zugeordnet werden. Die mit Hilfe der Regression ermittelten Faktoren für die Versuchsreihen sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Für die Versuchsreihen mit w/z-Werten von 0,45; 0,50 und 0,55 sind die Regressionsfunktionen beispielhaft in Abbildung 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.4: Mit Hilfe der Regression ermittelte Faktoren der Versuchsreihen.

Versuchsreihe	P_{max}	A	B	t_k
045	57,646	-2,087	-1,020	11,029
050	57,718	-2,488	-0,786	11,110
055	48,077	-2,415	-0,776	11,100
CEM II	47,464	-1,885	-0,791	11,085
CEM III	74,109	-2,427	-0,518	11,026
360	52,118	-2,009	-0,732	11,051
440	46,451	-1,907	-0,779	11,051
FM	59,243	-2,018	-0,913	11,137
LP 1/2	35,455	-2,575	-1,052	11,584
LP 3/4	33,126	-2,179	-0,599	11,070

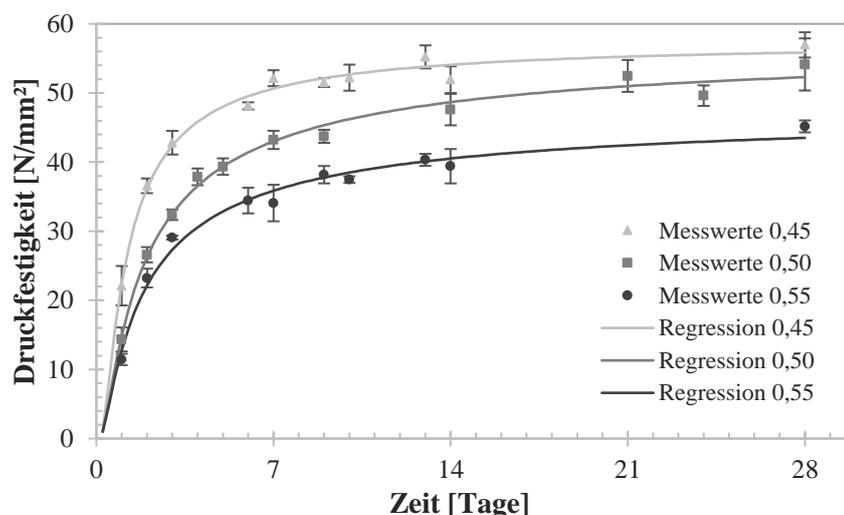


Abbildung 3.2: Beispielhafte Darstellung der ermittelten Druckfestigkeiten und der Regressionsfunktionen für die Versuchsreihen mit w/z-Werten von 0,45; 0,50 und 0,55.

Wie im Abschnitt 2.1.2 erläutert, können die schmalbandig aufgenommenen Mikrowellenmesswerte eine typische Resonanzkurve besitzen, welche sich im Laufe des Erhärtungsprozesses ändert. Je weiter der Erhärtungsprozess fortgeschritten ist, desto niedriger ist die Dämpfung des Mikrowellensignals und desto geringer ist der gemessene Feuchteindex. Ein Beispiel einer solchen Kurve zeigt Abbildung 3.3, wobei eine eindeutige Änderung des Minimums der Messkurve zu niedrigeren Feuchteindizes (FI) im Laufe des Erhärtungsprozesses sichtbar wird.

Zur Auswertung der Messkurven erfolgte in einem nächsten Schritt eine Definition von geeigneten Parametern (Kenngrößen auf der Messkurve), um den Erhärtungsprozess abbilden zu können. Gleichzeitig kann auch das gesamte Frequenzband genutzt werden. Zur Verknüpfung der Parameter oder der Änderung des Frequenzbandes mit den jeweiligen Druckfestigkeiten, werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Die Definition der Parameter sowie die Auswertung und somit Verknüpfung der Mikrowellendaten mit den Druckfestigkeiten, wird in Abschnitt 3.3 näher erläutert.

Die in den Versuchsreihen ermittelten Frischbetoneigenschaften können dem Anhang A.2, die ermittelten Druckfestigkeitsverläufe dem Anhang A.3 entnommen werden.

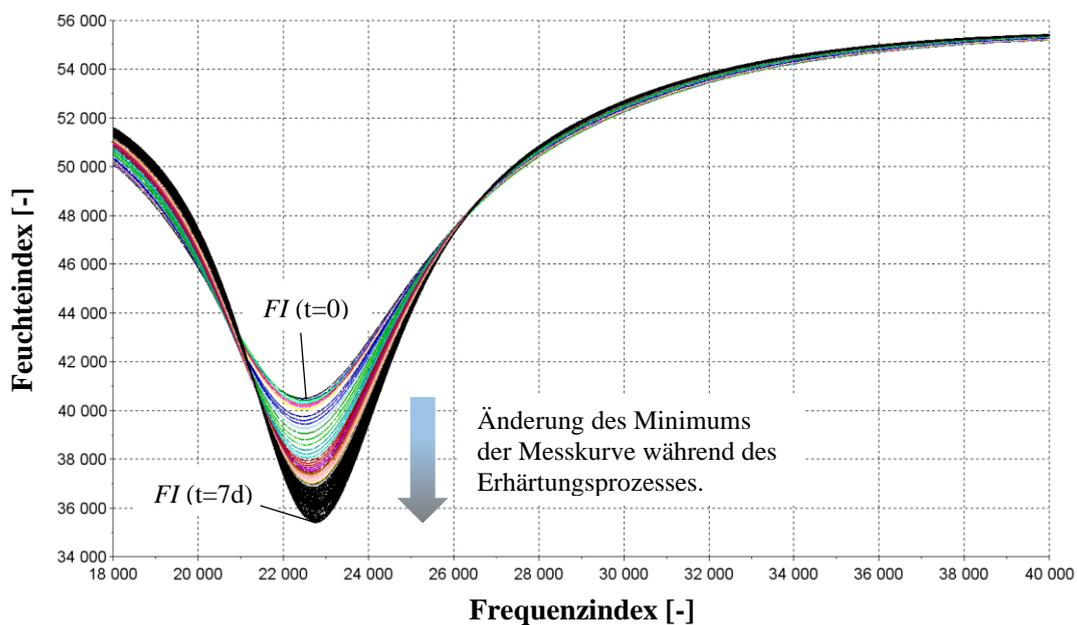


Abbildung 3.3: Beispiel von typischen Messkurven während des Erhärtungsprozesses für den resonanten Sensor R2P ($FI = \text{Feuchteindex}$).

3.2.2 Einfluss der Temperatur auf die Messwerte der Mikrowellentechnik

Zur Untersuchung möglicher Einflüsse der Temperatur auf das Mikrowellensignal wurden einerseits die Änderung der Temperatur des zu untersuchenden Materials und andererseits die Änderung der Sensortemperatur betrachtet. Dazu kam die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Versuchsanordnung zum Einsatz. Die Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur erfolgten dabei nicht an Beton, stattdessen wurde ein Sand mit einer definierten Feuchte von 13 M.-% genutzt. Dieses Vorgehen kann damit begründet werden, dass nur der Einfluss der Temperatur betrachtet werden sollte und somit eine Verwendung von Frischbeton nicht zielführend war. Bei der Nutzung eines erhärteten Betons kam es zu Einflüssen der Kopplung des Flansches auf die Messwerte. Es wurde nach einem inerten Material gesucht, bei welchem eine Einstellung einer bestimmten Feuchte und Temperatur möglich war. Die Wahl fiel auf einen Sand (Körnung 0 bis 2 mm), welcher in Anlehnung an Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Mikrowellentechnik in [Kup1] gewählt wurde.

Die Feuchte des Sandes wurde dabei vor den Untersuchungen in einem Zwangsmischer eingestellt und gleichzeitig homogenisiert. Nach dem Einfüllen des Materials erfolgte eine hygri-sche Versiegelung der Versuchsanordnung. Die gewünschten Temperaturen wurden mit einem Klimaschrank eingestellt und sollten die in der Praxis üblichen Werte erreichen. Das Vorgehen der Versuchsreihen zur Untersuchung des Einflusses der Sensortemperatur sowie der Materialtemperatur, wird im Folgenden näher erläutert.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Sensortemperatur auf das Mikrowellensignal erfolgte bei einer konstanten Raumtemperatur von 22 ± 1 °C, wobei der Sand die gleiche Temperatur besaß. Zur Variation der Sensortemperatur wurde ein Klimaschrank genutzt, in dem der Sensor platziert und in zwei Versuchsreihen auf eine maximale bzw. minimale Temperatur eingestellt wurde. Der Sensor kühlte bzw. erwärmte sich in ca. 50 bzw. 35 Minuten wieder auf Raumtemperatur (Abbildung 3.4 a)). Die maximale Sensortemperatur betrug dabei ca. 36 °C, die minimale ca. 9 °C.

Zur Untersuchung des Einflusses der Materialtemperatur auf das Mikrowellensignal wurde der Sand in zwei Versuchsreihen auf eine maximale bzw. minimale Temperatur eingestellt. Zum Einstellen der Temperatur wurde die Versuchsanordnung (ohne Sensor) im Klimaschrank platziert und für ca. 4 Stunden dort belassen. Anschließend erfolgte die Applikation des Thermo-elementes im Material. Die eigentliche Untersuchung fand bei einer Raumtemperatur von 22 ± 1 °C statt, wobei sich das Material in ca. 14 bzw. 10 Stunden wieder auf Raumtemperatur abkühlte bzw. erwärmte (Abbildung 3.4 b)). Die maximale Materialtemperatur betrug dabei ca. 34 °C, die minimale ca. 12 °C.

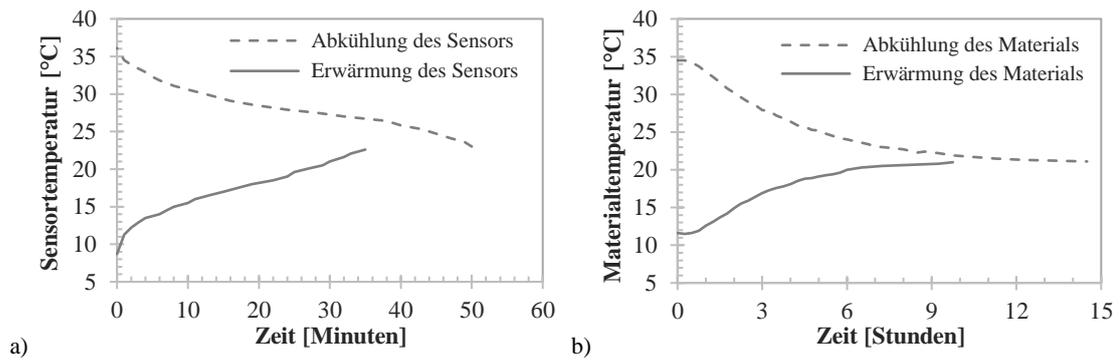


Abbildung 3.4: Entwicklung der Sensor- a) und Materialtemperatur b) während der Versuchsreihen.

Eine Darstellung und Erläuterung der gemessenen Mikrowellensignale in Abhängigkeit zu den Sensor- bzw. Materialtemperaturen, erfolgt in Abschnitt 3.3.6.

3.3 Auswertung der Untersuchungen

Die Auswertung der Untersuchungen soll die aufgenommenen Messdaten der Mikrowellentechnik mit dem Erhärtungsverhalten des Betons verknüpfen. Dazu wurden in den vorangegangenen Arbeiten anderer Autoren unterschiedliche Messgrößen, wie der elektrische Widerstand oder die relative Permittivität des Materials genutzt. Gleichzeitig kam unterschiedliche Sensorik zum Einsatz. In den eigenen Untersuchungen wurden drei verschiedene Sensoren, welche in einem schmalen Frequenzband (siehe Abschnitt 2.1.2) den Erhärtungsprozess untersuchten, eingesetzt. Diese Frequenzbandmessung erlaubt es im Folgenden, die Mikrowellendaten über mehrere Kenngrößen der Messkurve auszuwerten. Ziel der Auswertung ist es, Zusammenhänge der mittels Mikrowellentechnik aufgenommenen Messdaten mit der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton abzuleiten und dazu eine adäquate Kombination aus Auswerteverfahren und Sensorik zu erarbeiten.

Hierfür gliedert sich der folgende Abschnitt in die Erläuterung der genutzten Kenngrößen auf der Messkurve (Parameter) sowie die Beschreibung der Eigenschaften der Verläufe der Feuchteindizes (Abschnitt 3.3.1). Im Weiteren werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Versuchsreihen unter Variation der w/z-Werte vorgestellt, wobei zur Abbildung der Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen ein- bzw. mehrparametrische Auswerteverfahren genutzt werden. Aus der einparametrischen Auswertung der Versuchsreihen sollen Unterschiede in der Entwicklung der Parameter für die Sensoren, die Reproduzierbarkeit der Messungen (Abschnitt 3.3.3) und Abhängigkeiten der Parameter vom Erhärtungsprozess (Abschnitt 3.3.4) betrachtet werden. Daraufhin erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der multivariaten Auswertung der Messdaten (Abschnitt 3.3.5), wobei eine Analyse der notwendigen Anzahl an Faktoren sowie Hauptkomponenten und der erforderlichen Genauigkeit der Berechnungsmodelle durchgeführt wird. Es folgt eine Betrachtung von Maßnahmen zur Kompensation von möglichen Einflüssen der Material- bzw. Sensortemperatur auf die Messdaten der Mikrowellentechnik (Abschnitt 3.3.6). In Abschnitt 3.4 wird dann ein Berechnungsmodell für die einparametrische Auswertung der Untersuchungen aufgestellt und mit den mehrparametrischen Modellen verglichen. Aus diesem Vergleich soll die adäquate Kombination aus Datenanalyseverfahren und Sensor zur Abbildung der Druckfestigkeit aus den Mikrowellendaten gewählt werden. Eine Anwendung des gewählten Berechnungsmodells auf unterschiedliche Betonzusammensetzungen erfolgt in Abschnitt 3.4.3. In Abschnitt 3.4.4 werden die Ergebnisse zweier Feldversuche vorgestellt. Das Vorgehen zur Auswertung der Untersuchungen verdeutlicht Abbildung 3.5.

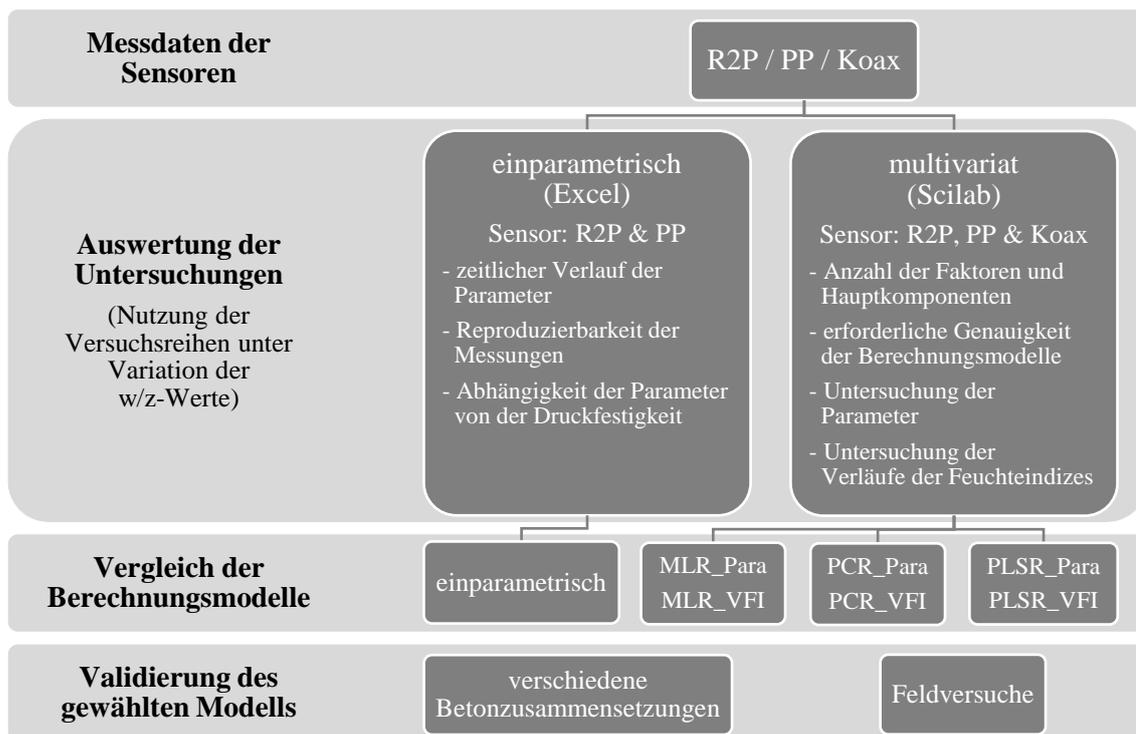


Abbildung 3.5: Vorgehen zur Auswertung der Untersuchungen des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe.

Zur Bewertung der Verfahren und Sensoren werden Kriterien wie der mittlere Fehler, der maximale Fehler und das Bestimmtheitsmaß der Werte des Berechnungsmodells im Vergleich zu den Referenzwerten genutzt (siehe Abschnitt 2.4.4).

Die Messung der Mikrowellensignale erfolgte über einen Zeitraum von 7 Tagen nach der Betonage, wobei für die Berechnungsmodelle der gleiche Modellzeitraum genutzt wurde.

Die zur Abbildung der Druckfestigkeit genutzte multivariate Datenanalyse erfolgte mit Hilfe des Programms Scilab. Das genutzte Scilab-Script wurde in Zusammenarbeit mit der Firma hf sensor GmbH entwickelt.

3.3.1 Eigenschaften der Parameter und Frequenzverläufe

Für die Auswertung der Mikrowellensignale wurden ausgewählte Parameter der Messkurve genutzt (Abbildung 3.6), welche in Tabelle 3.5 für die Sensoren (R2P und PP) aufgelistet und beschrieben sind. Die gewählten Parameter stellen dabei typische Kenngrößen zur Beschreibung von Resonanzkurven dar [Gir1]. Die Parameter *Güte1* und *Güte2* beschreiben zum Beispiel die Resonanzschärfe der Messkurve, welche eine Maß für den Energieverlust der Mikrowellen ist.

Für die multivariate Auswertung der Mikrowellensignale konnten, neben den Parametern, auch die aufgenommenen Verläufe der Feuchteindizes der drei Sensoren (R2P, PP und Koax) genutzt werden. Die Verläufe der Feuchteindizes besitzen dabei, abhängig vom Sensor, eine unterschiedliche Auflösung und somit Anzahl von Einzelfrequenzpunkten: R2P – 20000 / PP – 28000 / Koax – 10000. Zur Auswertung wurde jedoch aus rechen-technischen Gründen nicht die vollständige Anzahl der Einzelfrequenzpunkte genutzt, sondern eine äquidistante Teilung vorgenommen. Es wurde eine Frequenzschrittweite von 100 festgelegt, womit eine Analyse des Erhärtungsprozesses mit 101 bis 281 Einzelpunkten des Frequenzbandes möglich ist.

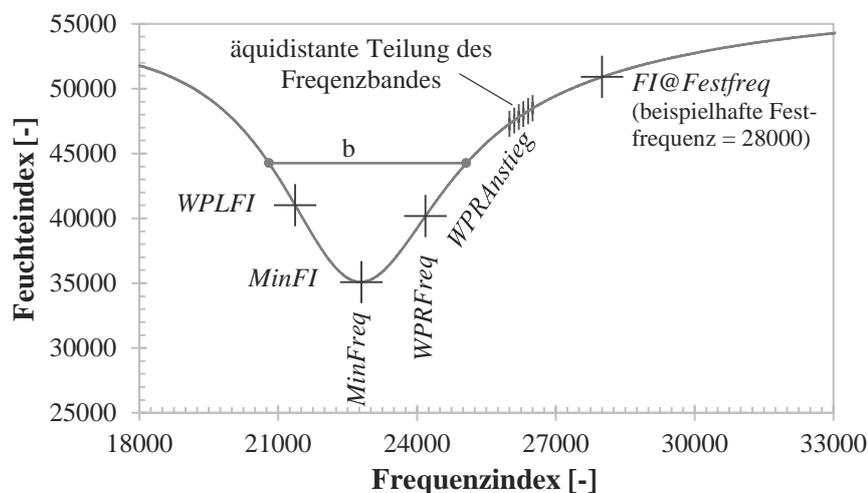


Abbildung 3.6: Beispielhafte Darstellung ausgewählter Kenngrößen und Parameter.

Tabelle 3.5: Definierte Parameter der resonanten Sensoren.

Nummer	Parameter	Beschreibung
1	$MinFreq$	Frequenzindex im Minimum
2	$MinFI$	Feuchteindex im Minimum
3	$WPLFreq$	Frequenzindex im linken Wendepunkt
4	$WPLFI$	Feuchteindex im linken Wendepunkt
5	$WPLAnstieg$	Anstieg der Kurve im linken Wendepunkt
6	$WPRFreq$	Frequenzindex im rechten Wendepunkt
7	$WPRFI$	Feuchteindex im rechten Wendepunkt
8	$WPRAnstieg$	Anstieg der Kurve im rechten Wendepunkt
9	$Güte1$	Quotient aus $MinFreq$ und der Breite der Resonanzkurve bei halber Höhe (b)
10	$Güte2$	Quotient aus $MinFreq$ und der Differenz aus $WPRFreq$ und $WPLFreq$
11	$MinFI''$	Anstieg der Ableitung bei $MinFI$
12	\bar{FI}	Mittelwert über alle Feuchteindizes
13	$FI@Festfreq$	Feuchteindex bei einer festen Frequenz

3.3.2 Normierung der Druckfestigkeiten

Der theoretisch angenommene Luftporengehalt eines Frischbetons liegt bei 1,5 Vol.-%. Bei der Herstellung eines Betons kann es jedoch zu Schwankungen des Porengehaltes kommen, wobei der Luftporengehalt Einfluss auf die spätere Druckfestigkeit des Betons besitzt. Auf die Mikrowellenmessung besitzen die kleinen Luftporen, bis zu einem gewissen Anteil, jedoch keinen Einfluss. Um den Einfluss von variierenden Luftporengehalten im Beton auf die Druckfestigkeit zu kompensieren, wurden die gemessenen Druckfestigkeiten f_c normiert. Dies erfolgte mit Hilfe der während der Herstellung des Betons ermittelten Luftporengehalte des Frischbetons A , wobei die normierten Druckfestigkeiten $f_{c,norm}$ auf einen Standardluftporengehalt von 1,5 Vol.-% bezogen wurden. Die Umrechnung der in den eigenen Untersuchungen ermittelten Druckfestigkeiten erfolgte mit einem Wert von 4,0 % Druckfestigkeitsverlust, bei einer Erhöhung des Luftporengehaltes um 1,0 Vol.-% (Gleichung 3.1). Dieser Wert wurde aus den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen und in Anlehnung an die Arbeiten von KEIL [Kei1] (3,0 – 4,0 %) sowie GRÜBL [Grü1] (3,5 – 4,5 %) festgelegt.

$$f_{c,norm} = f_c + 4,0 \cdot (A - 1,5) \quad 3.1$$

Die normierten Druckfestigkeiten aller Versuchsreihen können dem Anhang A.3 entnommen werden.

3.3.3 Ergebnisse der einparametrischen Datenanalyse

Die einparametrische Auswertung der Untersuchungen des Erhärtungsprozesses erfolgte an den Versuchsreihen mit unterschiedlichen w/z-Werten. Es stehen somit jeweils neun Versuchsreihen für die zwei Sensoren R2P und PP (siehe Abschnitt 2.1.2) zur Verfügung, mit deren Hilfe die Entwicklung der gemessenen Parameter, Unterschiede in der genutzten Sensortechnik, eine Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess und Einflüsse des w/z-Wertes auf die Parameter aufgezeigt werden können.

Entwicklung der Parameter während des Erhärtungsprozesses und Reproduzierbarkeit der Messungen

Wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, erfolgte die Aufzeichnung der Messkurven in einem gewählten Intervall, wobei die zur Auswertung genutzten Daten über einen Zeitraum von 7 Tagen ermittelt worden sind. Damit lässt sich die Entwicklung der Parameter während des Erhärtungsprozesses abbilden und auswerten.

Abbildung 3.7 a) zeigt beispielhaft die Entwicklung der Parameter *MinFI*, *WPLAnstieg* und *Güte1* für den Sensor R2P während des Erhärtungsprozesses. Dabei werden die

Änderungen, aber auch die unterschiedliche Größenordnung der Parameter sichtbar. Der Parameter *MinFI* besitzt einen Startwert von ca. 40400 und einen Endwert nach 7 Tagen von ca. 34500. Die Änderung der Parameter *WPLAnstieg* und *GüteI* ist dagegen deutlich geringer, sie beträgt für den Parameter *WPLAnstieg* ca. 3,4 und für *GüteI* ca. 16. Betrachtet man jedoch die prozentuale Änderung der Parameter, so ergibt sich ein anderes Bild. Der Parameter *MinFI* besitzt eine prozentuale Änderung von ca. 15 %, *WPLAnstieg* ca. 113 % und *GüteI* ca. 51 %. Die Entwicklung der drei gewählten Parameter ist dabei S-förmig. Inwieweit die Parameter eine Abhängigkeit zum Erhärtungsprozess von Beton zeigen, wird im Folgenden näher betrachtet.

Für jeden w/z-Wert wurden insgesamt drei Versuchsreihen durchgeführt, hierbei erfolgte anhand der zwei Wiederholungsmessungen die Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen. Abbildung 3.7 b) zeigt beispielhaft für die Versuchsreihen mit einem w/z-Wert von 0,45 und dem Sensor R2P die Verläufe des Parameters *MinFI*. Für die neun Versuchsreihen unter Variation der w/z-Werte konnte dabei für den Sensor R2P eine Standardabweichung von 170 Feuchteindizes ermittelt werden. Wie im Weiteren noch gezeigt wird, konnte diese Reproduzierbarkeit jedoch nicht bei jedem Parameter und für beide eingesetzte Sensoren erreicht werden.

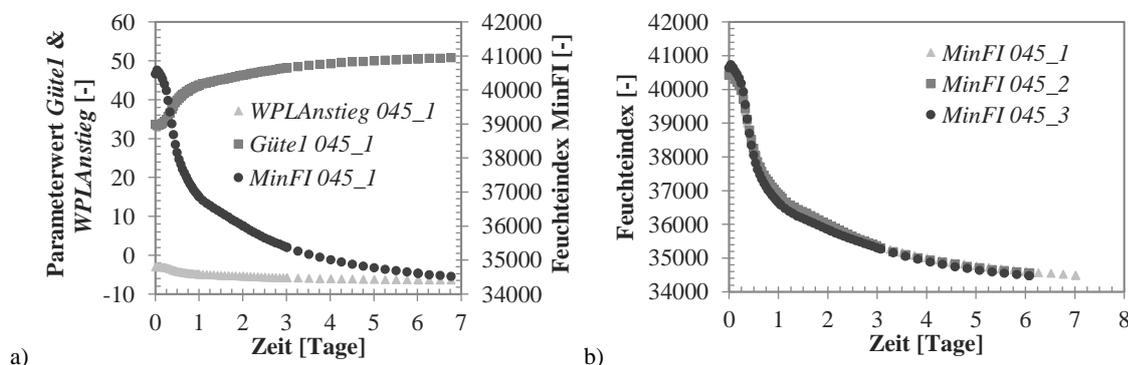


Abbildung 3.7: Entwicklung ausgewählter Parameter der Versuchsreihe 045_1 a) und Beispiel der Reproduzierbarkeit des Parameters *MinFI* b).

Werden die Sensoren, welche zur einparametrischen Datenanalyse genutzt wurden, verglichen (R2P und PP), so wird deutlich, dass die Sensoren unterschiedliche Verläufe in den gleichen Parametern zeigen. In Abbildung 3.8 sind beispielhaft die Verläufe des Parameters *MinFI* für den Sensor R2P a) und den Sensor PP b) für die Versuchsreihen mit einem w/z-Wert von 0,55 dargestellt. Im Vergleich zum Sensor R2P zeigt der PP keinen S-förmigen Verlauf des Parameters. Zu Beginn der Messung traten erhebliche Streuungen auf und über den gesamten Messzeitraum konnte beim Sensor PP kein einheitliches Verhalten der Parameter festgestellt werden. Dieses uneinheitliche Verhalten des Sensors PP kann nach Meinung des Autors mit der geringeren Sensitivität des Sensors gegenüber polarisierbaren Stoffen erklärt werden (siehe Abschnitt 2.1.2).

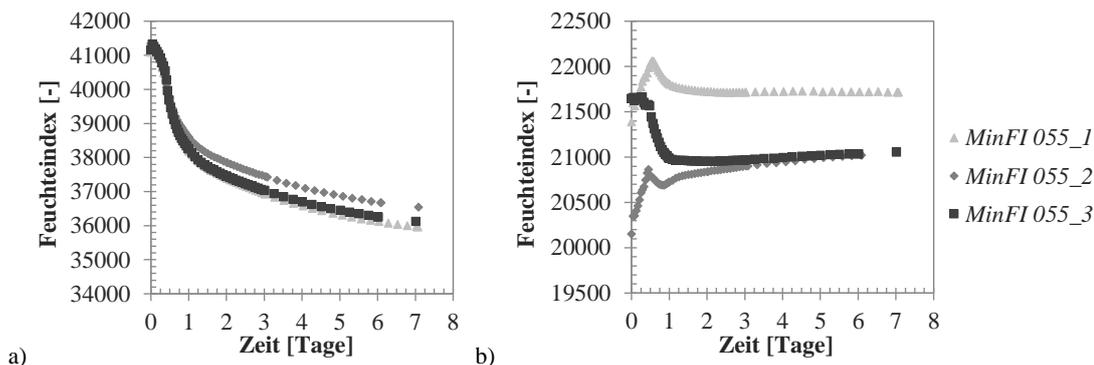


Abbildung 3.8: Beispielhafte Gegenüberstellung des Parameterverlaufes ($MinFI$) für die Sensoren R2P a) und PP b) mit einem w/z -Wert von 0,55.

Die Verläufe der weiteren Parameter sind für beide Sensoren im Anhang C.1 dargestellt.

Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess

Zur Analyse der Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess wurden die in Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Parameter für den Sensor R2P und PP hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit der Druckfestigkeitsentwicklung untersucht.

Mit dem Programm Scilab erfolgte hierfür eine Ermittlung der Korrelation der Parameter mit den Referenzwerten, wobei die Bewertung der Abhängigkeit anhand der in Abschnitt 2.4.4 genannten statistischen Kenngrößen erfolgte. Zusätzlich zu diesen Kenngrößen wurde die Entwicklung der Parameter während des Erhärtungsprozesses zur Bewertung herangezogen.

In Tabelle 3.6 sind die Ergebnisse der neun Versuchsreihen zur Untersuchung der Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess dargestellt. Für den Sensor R2P zeigt sich, dass bis auf $WPRFreq$ und $\emptyset FI$ eine Abhängigkeit der Parameter von der Druckfestigkeit festgestellt werden konnte. Beim Parameter $MinFI''$ wurden geringe Werte ermittelt. $MinFreq$ zeigte keinen funktionalen Zusammenhang mit der ermittelten Druckfestigkeit, was bedeutet, dass den Parameterwerten mehrere Referenzwerte zugeordnet werden können. Die größte Abhängigkeit von der Druckfestigkeit zeigen die Parameter $MinFI$, $WPLANstieg$, $WPRAnstieg$, $Güte1$ und $FI@Festfreq$.

Bei dem Sensor PP zeigen die Parameter $MinFreq$, $WPLFreq$, $\emptyset FI$ und $FI@Festfreq$ eine Abhängigkeit von der Druckfestigkeit. Den Parametern $Güte1$, $WPRAnstieg$, $WPLANstieg$ und $MinFI$ können mehrere Druckfestigkeiten zugeordnet werden, welches es unmöglich macht, eine Aussage zur Druckfestigkeitsentwicklung zu treffen.

Aus Abbildung 3.8 und Tabelle 3.6 ist zu entnehmen, dass der Sensor R2P eine größere Abhängigkeit von der Druckfestigkeit sowie reproduzierbare Verläufe in den Parametern im Vergleich zum Sensor PP besitzt. Aus diesem Grund wird der Sensor R2P in

Kombination mit dem Parameter *MinFI* im Folgenden zur Untersuchung des Einflusses des w/z-Wertes und zur Gegenüberstellung des Parameters mit der ermittelten Druckfestigkeit genutzt.

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Untersuchung zur Abhängigkeit der Parameter von der Druckfestigkeitsentwicklung.

Parameter		Mittlerer Fehler [N/mm ²]		Maximaler Fehler [N/mm ²]		Bestimmtheitsmaß [-]	
		R2P	PP	R2P	PP	R2P	PP
1	<i>MinFreq</i>	3,38	4,97	7,31	8,08	0,9697	0,9347
2	<i>MinFI</i>	2,33	7,33	4,00	17,46	0,9890	0,8041
3	<i>WPLFreq</i>	3,76	5,48	6,86	11,31	0,9630	0,9219
4	<i>WPLFI</i>	3,35	10,66	6,77	21,22	0,9707	0,6257
5	<i>WPLANstieg</i>	2,66	6,43	4,91	15,03	0,9812	0,8468
6	<i>WPRFreq</i>	7,12	8,81	13,63	17,99	0,8627	0,7958
7	<i>WPRFI</i>	3,35	8,31	6,07	18,09	0,9707	0,7357
8	<i>WPRAnstieg</i>	2,67	7,16	4,97	15,78	0,9811	0,8107
9	<i>Güte1</i>	3,01	6,61	5,53	15,88	0,9761	0,8500
10	<i>Güte2</i>	3,39	11,49	6,18	21,48	0,9735	0,5243
11	<i>MinFI''</i>	3,85	8,97	6,37	19,45	0,9787	0,6940
12	<i>ØFI</i>	4,26	5,43	7,45	8,60	0,9517	0,9225
13	<i>FI@Festfreq</i>	3,09	3,80	5,49	7,60	0,9749	0,9612

Einfluss des w/z-Wertes

Zur Untersuchung des Einflusses des w/z-Wertes wurden einerseits die Startwerte und andererseits der Verlauf der Parameter während des Erhärtungsprozesses betrachtet.

Die untersuchten Betonzusammensetzungen besitzen unterschiedliche Wasseranteile, aber gleiche Zementmengen. Dieser Unterschied in den Wasseranteilen sollte zu Beginn der Messungen sichtbar werden [Sha1], [Jam1] und [She1] (siehe Abschnitt 2.2.3). Im weiteren Verlauf des Erhärtungsprozesses ist nach [Jam1] ebenfalls mit unterschiedlichen Parameterverläufen zu rechnen.

Eine Auswahl von Parameterverläufen der Versuchsreihen mit w/z-Werten von 0,45; 0,50 und 0,55 sind in Abbildung 3.9 a) dargestellt. Die Startwerte zeigen dabei keine eindeutige Abhängigkeit vom w/z-Wert, wobei mit höherem w/z-Wert zu Beginn der Messung, auch mit höheren Feuchteindizes zu rechnen ist. Aufgrund der Prüfstreuungen wurde diese Abstufung in den Feuchteindizes zu Beginn der Messung jedoch nicht sichtbar. Bei einem Vergleich der Feuchteindizes der Versuchsreihen 045_1 und 055_2 kann qualitativ eine Abstufung der Feuchteindizes mit dem w/z-Wert angenommen

werden. So zeigen die Versuchsreihen mit höherem Wasseranteil (055_2) einen höheren Feuchteindex zu Beginn der Messung im Vergleich zur Versuchsreihe mit einem etwas geringeren Wasseranteil (045_1).

Da jedoch nicht der Wasseranteil im Material, sondern die Änderung des Minimums der Resonanzkurve in Abhängigkeit zur Druckfestigkeitsentwicklung untersucht werden sollte, erfolgte eine Tarierung des Startwertes der Mikrowellenmessung (Gleichung 3.2). Es wurde somit nur die Änderung des Parameters im Laufe des Erhärtungsprozesses $MinFI_t$ im Bezug zum Feuchteindex zu Beginn der Messung $MinFI_{t=0}$ betrachtet.

$$\Delta MinFI = |MinFI_{t=0} - MinFI_t| \quad 3.2$$

Wie beispielhaft in Abbildung 3.9 b) dargestellt, zeigt der Verlauf des Parameters $\Delta MinFI$, in Abhängigkeit von der Zeit und dem w/z-Wert, eine unterschiedliche Änderung in Bezug zum Startwert. Die Versuchsreihen mit einem w/z-Wert von 0,45 zeigen die größte Änderung des Parameters im Laufe des Erhärtungsprozesses. Dabei wurde nach einer Messdauer von 7 Tagen eine Änderung der Feuchteindizes von ca. 6000 gemessen, wobei sich mit steigendem w/z-Wert die Änderung des Parameters verringert. Für den w/z-Wert von 0,50 konnte eine Änderung von ca. 5000 und für den w/z-Wert von 0,55 eine Änderung von ca. 4800 gemessen werden.

Die größere Änderung des Parameters bei niedrigeren w/z-Werten kann damit erklärt werden, dass unterschiedliche Wassergehalte im hygrisch versiegelten System vorhanden sind. Der Zement bindet eine konstante Menge des Anmachwassers, das restliche Wasser bleibt ungebunden im System erhalten. Die Änderung der dielektrischen Eigenschaften von Beton zeigt in den Untersuchungen somit ein abgestuftes Verhalten. Bei geringeren w/z-Werten werden größere Änderungen in den dielektrischen Eigenschaften sichtbar, wohingegen bei einem w/z-Wert von 0,55 eine geringere Änderung im Laufe des Erhärtungsprozesses zu erkennen ist.

Solche Unterschiede in der Änderung der dielektrischen Eigenschaften während des Erhärtungsprozesses von Beton, abhängig vom w/z-Wert, wurden bereits von [Jam1] beobachtet. Jedoch zeigten ihre Ergebnisse, dass bei höherem w/z-Wert mit einer größeren Änderung der relativen Permittivität zu rechnen ist, was im Widerspruch zu den eigenen Ergebnissen steht. Dies kann damit erklärt werden, dass in den Ergebnissen von [Jam1] nicht nur der Erhärtungsprozess, sondern auch der Trocknungsprozess abgebildet wird. In den eigenen hygrisch versiegelten Untersuchungen wird nur die chemische Bindung des Anmachwassers sichtbar. Die Menge an Wasser, welche im Beton verbleibt, ist bei einem höheren w/z-Wert größer. Dies sorgt dafür, dass die Änderung des Feuchteindex bei höheren w/z-Werten geringer ausfällt.

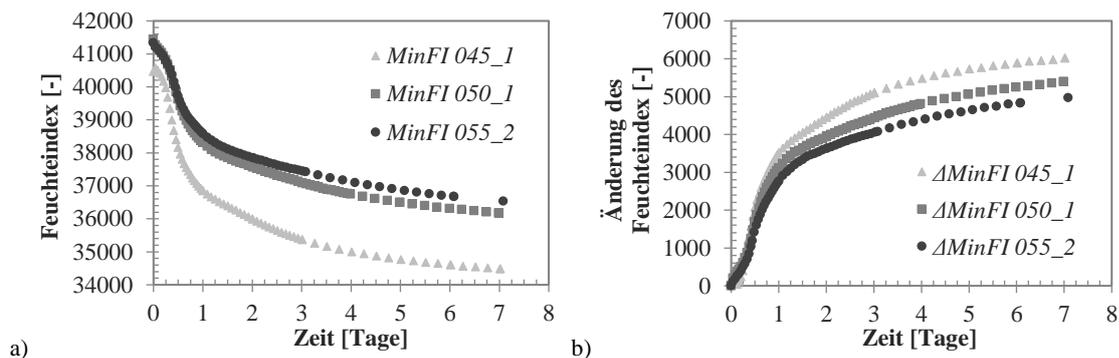


Abbildung 3.9: Einfluss des w/z-Wertes auf die Feuchteindizes zu Beginn der Messung a) und Änderung des Parameters $\Delta MinFI$ b) in Abhängigkeit von der Zeit und dem w/z-Wert.

3.3.4 Abhängigkeit des Parameters $\Delta MinFI$ von der Druckfestigkeit

Im Folgenden wurden die Werte der normierten Druckfestigkeiten $f_{c,norm}$ und die Änderung der Feuchteindizes im Minimum ($\Delta MinFI$) für den Sensor R2P hinsichtlich ihres Zusammenhangs ausgewertet.

Abbildung 3.10 zeigt das Ergebnis der Gegenüberstellung der gemessenen Werte, wobei die Druckfestigkeiten in Abhängigkeit zur Änderung des Parameters ($\Delta MinFI$) für die Versuchsreihen mit w/z-Werten von 0,45; 0,50 und 0,55 dargestellt sind. Das Diagramm macht deutlich, dass ein nahezu direkter Zusammenhang der ermittelten Druckfestigkeiten und der Änderung des Parameters, unabhängig vom w/z-Wert existiert. Die Druckfestigkeitsentwicklung zeigt somit eine Korrelation mit der Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Materials. Dabei werden in den Endwerten der Versuchsreihen (7 Tage Druckfestigkeiten) auch die unterschiedlichen Druckfestigkeiten abhängig vom eingesetzten w/z-Wert deutlich. So besitzt ein w/z-Wert von 0,45 eine Druckfestigkeit nach 7 Tagen von ca. 52 N/mm², ein w/z-Wert von 0,55 ca. 34 N/mm².

Bereits [She1] fanden in ihren Untersuchungen einen Zusammenhang der Druckfestigkeit mit der relativen Permittivität eines Zementmörtels. Die eigenen Untersuchungen bestätigen und übertragen ihre Ergebnisse auf Beton.

In Abbildung 3.11 ist eine repräsentative Versuchsreihe (045_3) mit den maximalen Abweichungen der verbleibenden Versuchsreihen dargestellt. Es wird deutlich, dass gerade zu Beginn der Messung, bei niedrigen Druckfestigkeiten, die Abweichungen gering sind und sich stetig, mit wachsender Druckfestigkeit, vergrößern. Insgesamt konnte eine geringe mittlere Abweichung über alle Versuchsreihen von 2,0 N/mm² festgestellt werden.

Der Zusammenhang der Druckfestigkeit mit der Änderung des Parameters $\Delta MinFI$ wird später zur Aufstellung des einparametrischen Berechnungsmodells genutzt.

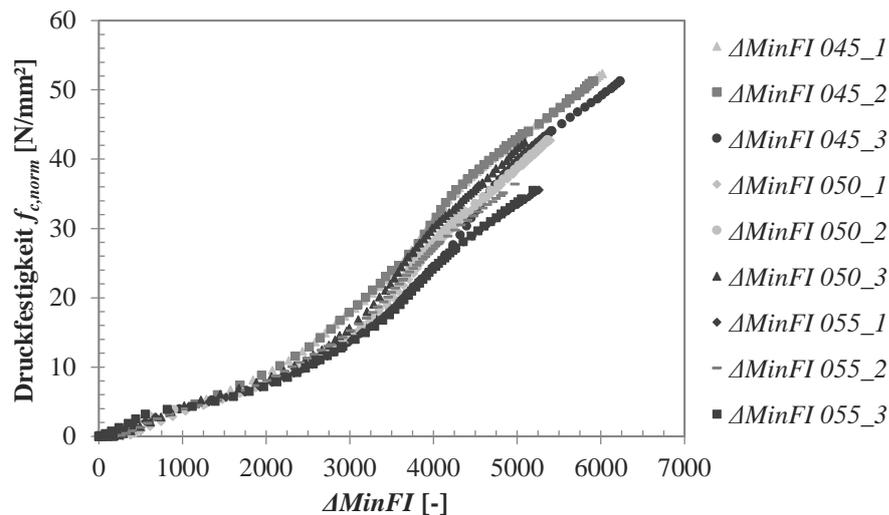


Abbildung 3.10: Normierte Druckfestigkeit in Abhängigkeit zur Änderung des Feuchteindex im Minimum ($\Delta MinFI$) für die Versuchsreihen mit unterschiedlichen w/z-Werten und dem Sensor R2P.

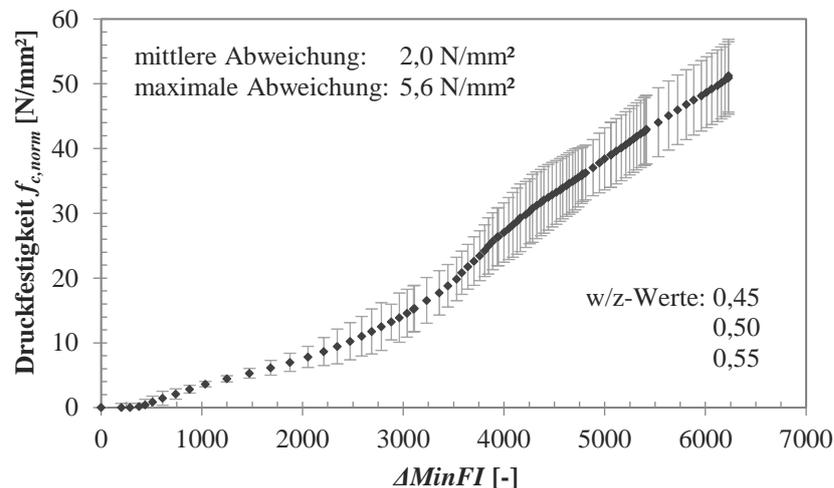


Abbildung 3.11: Abweichung der normierten Druckfestigkeit $f_{c,norm}$ in Abhängigkeit zur Änderung des Feuchteindex im Minimum $\Delta MinFI$ (repräsentative Versuchsreihe: 045_3).

3.3.5 Ergebnisse der multivariaten Datenanalyse

Die multivariate Datenanalyse ermöglicht es, die Rohdaten zu komprimieren und im Weiteren ein Berechnungsmodell aufzustellen, welches aus der Änderung der Parameter während des Erhärtungsprozesses und dem Verlauf der Referenzwerte, einen funktionalen Zusammenhang erstellt. Dabei kann die Bewertung der Genauigkeit des Berechnungsmodells nur mit einer Gegenüberstellung der Referenzwerte mit den berechneten Werten erfolgen. Als Bewertungskriterien dienen dabei die in Abschnitt 2.4.2 genannten Größen wie der mittlere Fehler, der maximale absolute Fehler und das Bestimmtheitsmaß.

Die multivariate Datenanalyse verknüpft die Mikrowellenmessdaten mit den Referenzwerten. Dabei erfolgt bei der Hauptkomponentenregression (PCR) und der Partial Least Squares Regression (PLSR) eine Aufbereitung der Messdaten mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse (siehe hierzu Abschnitt 2.4). Zur gesamten multivariaten Datenanalyse wurde das Programm Scilab genutzt, wobei mit Hilfe des entwickelten Scilab-Scripts die Durchführung der Hauptkomponentenanalyse und eine anschließende Aufstellung der Berechnungsmodelle mit Hilfe der Regressionsverfahren ermöglicht wurde.

Die multivariate Untersuchung der Parameter konnte dabei an den Sensoren R2P und PP, die Untersuchung der Änderung der Feuchteindizes im Frequenzverlauf an allen drei eingesetzten Sensoren (R2P, PP und Koax) durchgeführt werden. Insgesamt ergeben sich somit 135 Berechnungsmodelle der Einzelversuche für die neun Versuchsreihen mit unterschiedlichen w/z-Werten. Jedes Berechnungsmodell wurde im Weiteren auf die Wiederholungsmessungen mit gleichem w/z-Wert angewendet. Dieses Vorgehen sollte die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen untersuchen und mögliche Streuungen aufzeigen. Es müssen somit unterschieden werden:

➤ **Kalibrierung:**

Berechnungsmodelle für die Einzelversuche, welche aus der Verknüpfung der Messdaten der Mikrowelle und den Referenzwerten aufgestellt worden sind und deren Genauigkeitsangaben.

➤ **Validierung:**

Anwendungen der Berechnungsmodelle auf Messdaten von anderen Versuchsreihen mit gleichem w/z-Wert (Wiederholungsmessungen) und deren Genauigkeitsangaben. Die Bezeichnung der Anwendungen entspricht dabei:

Messdaten_der_Versuchsreihe auf Modell_der_Versuchsreihe

Im Folgenden werden die Ergebnisse der multivariaten Datenanalyse für die Multiple Lineare Regression (MLR), die Hauptkomponentenregression (PCR) und die Partial Least Square Regression (PLSR) sowohl für die Untersuchung der Parameter als auch für die Untersuchung der Änderung der Feuchteindizes im Frequenzverlauf vorgestellt. Zuvor erfolgen eine Analyse der erforderlichen Genauigkeit und eine Untersuchung der nötigen Anzahl an Faktoren bzw. Hauptkomponenten zur Erstellung der multivariaten Berechnungsmodelle.

Analyse der erforderlichen Genauigkeit der Berechnungsmodelle

Die Aufstellung der multivariaten Berechnungsmodelle erfolgt iterativ, wobei eine unterschiedliche Anzahl an Iterationsschritten genutzt werden kann. Je größer die Anzahl

ist, desto genauer wird das Berechnungsmodell und desto länger ist die Rechendauer. Zur Festlegung der nötigen Anzahl an Iterationsschritten wurde eine Untersuchung der Genauigkeit der Berechnungsmodelle durchgeführt. Dabei sollte sich die Genauigkeit, der mit Hilfe der Verfahren aufgestellten Berechnungsmodelle, an der Prüfstreuung der ermittelten Referenzwerte der eigenen Untersuchungen orientieren. Die Druckfestigkeiten der Untersuchungen besitzen eine Standardabweichung von $1,4 \text{ N/mm}^2$ und einen maximalen Fehler $5,8 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anhang A.3).

Die Untersuchung zur nötigen Anzahl von Iterationsschritten erfolgte dabei mit Hilfe des Programms Scilab und des entwickelten Scilab-Scripts. Es kamen die neun Versuchsreihen mit unterschiedlichen w/z-Werten zum Einsatz, an welchen für das gesamte Frequenzband und die Parameter der mittlere- und der maximale Fehler des Berechnungsmodells bei der Kalibrierung der Einzelversuche ermittelt wurden. Erreicht das Berechnungsmodell die oben genannte Genauigkeit der eigenen Untersuchungen, war eine ausreichende Anzahl an Iterationsschritten erreicht.

Aus der Untersuchung der Genauigkeit der Berechnungsmodelle konnte die Anzahl der Iterationsschritte auf 500 Durchläufe beschränkt werden. Dies entspricht einer Genauigkeit von $< 1,5 \text{ N/mm}^2$ im mittleren Fehler und $< 4,0 \text{ N/mm}^2$ im maximalen Fehler.

Relevante Anzahl an Faktoren bzw. Hauptkomponenten

Für die Modellbildung können maximal 13 Faktoren aus den gewählten Parametern und bis zu 281 Hauptkomponenten genutzt werden. Um kein Rauschen im Messsignal zu modellieren und somit die Berechnungsmodelle so stabil wie möglich zu halten, wurde die Anzahl der genutzten Faktoren und Hauptkomponenten untersucht. Als Kriterium zur Beurteilung der nötigen Anzahl diente die Varianz in den Messdaten. Erklärte die Varianz einen größeren Anteil als 99,9 % der Änderung in den Messdaten, war eine ausreichende Anzahl an Faktoren bzw. Hauptkomponenten erreicht.

Die Untersuchung zur relevanten Anzahl an Faktoren bzw. Hauptkomponenten erfolgte dabei mit dem Programm Scilab und dem entwickelten Scilab-Script, wobei erneut die neun Versuchsreihen mit unterschiedlichen w/z-Werten zum Einsatz kamen, an denen die Hauptkomponentenanalyse durchgeführt und die Varianzen in den Messdaten bestimmt wurden.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass eine Anzahl von fünf Faktoren bzw. Hauptkomponenten ausreichend zur Aufstellung der Berechnungsmodelle ist.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Parameter (*_Para_*) besitzen bei der Aufstellung der Berechnungsmodelle für die Einzelversuche (Kalibrierung) eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit den Referenzwerten. Es konnte über alle Versuchsreihen ein mittlerer Fehler von 1,7 N/mm² und ein maximaler Fehler von 3,9 N/mm² ermittelt werden. Bei der Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen (Validierung) konnte diese Genauigkeit jedoch nicht erreicht werden.

Abbildung 3.12 zeigt beispielhaft für die drei Analyseverfahren (MLR, PCR und PLSR) die Anwendung der Berechnungsmodelle für den Sensor R2P und die Versuchsreihen mit einem w/z-Wert von 0,45. Hierbei sind deutliche Abweichungen der berechneten Werte von den Referenzwerten (*ref. DF*) zu erkennen. Für die hier dargestellten Versuchsreihen ergeben sich ein mittlerer Fehler von 5,1 N/mm² und ein maximaler Fehler von 13,9 N/mm². Für alle neun Versuchsreihen und dem Sensor R2P wurden ein mittlerer Fehler von 5,8 N/mm² und ein maximaler Fehler von 20,9 N/mm² ermittelt.

Dies verdeutlicht, dass die Aufstellung der Berechnungsmodelle mit einer ausreichenden Genauigkeit erfolgen kann, die Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen aber zu Abweichungen der berechneten Werte von den Referenzwerten führt. Eine Aussage zur Druckfestigkeit des Betons wäre aufgrund der eingeschränkten Reproduzierbarkeit nur mit den oben genannten Abweichungen möglich.

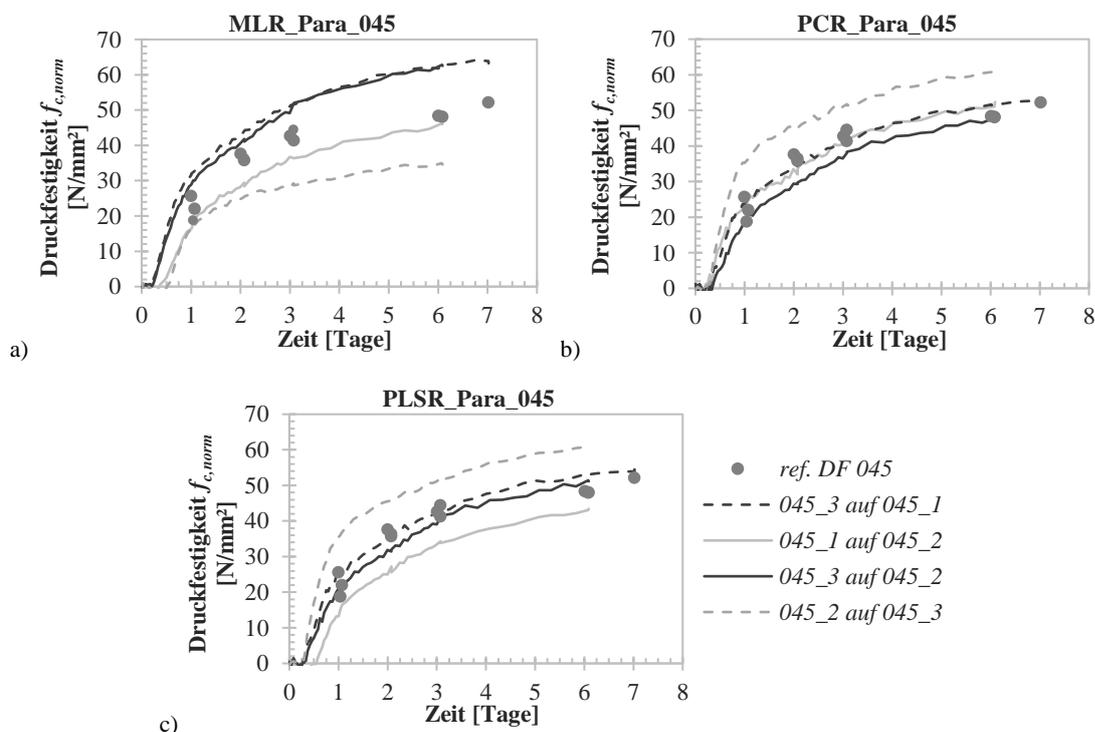


Abbildung 3.12: Beispielhafte Ergebnisse für die Anwendung der Verfahren MLR a), PCR b) und PLSR c) der Parameter (w/z = 0,45 und Sensor R2P).

Wie die Ergebnisse der Parameteruntersuchung, zeigen auch die Ergebnisse der Untersuchung der Feuchteindexverläufe ($_VFI_$) ein analoges Verhalten. Die Aufstellung der Berechnungsmodelle der Einzelversuche konnte mit einer hohen Genauigkeit erfolgen. Dabei wurden ein mittlerer Fehler von $1,3 \text{ N/mm}^2$ und ein maximaler Fehler von $3,7 \text{ N/mm}^2$ bei der Aufstellung der Berechnungsmodelle für die Einzelversuche erreicht. Jedoch zeigen die Anwendungen der Modelle auf die Wiederholungsmessungen erneut Abweichungen der berechneten Werte von den Referenzwerten, welche unter Nutzung der Änderung der Verläufe im Vergleich zur Untersuchung der Parameter noch deutlich größer sind (Abbildung 3.13). Für alle neun Versuchsreihen und den Sensor R2P ergeben sich ein mittlerer Fehler von $10,3 \text{ N/mm}^2$ und ein maximaler Fehler von $75,1 \text{ N/mm}^2$, hierbei entsprechen die genannten Fehlerwerte auch den hier dargestellten Versuchsreihen.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Verläufe der Feuchteindizes verdeutlichen, dass die Berechnungsmodelle mit einer hohen Genauigkeit aufgestellt werden können. Werden jedoch die Modelle auf die Wiederholungsmessungen angewendet, so ergeben sich erhebliche Streuungen und eine Aussage zur Druckfestigkeitsentwicklung ist nicht mehr möglich.

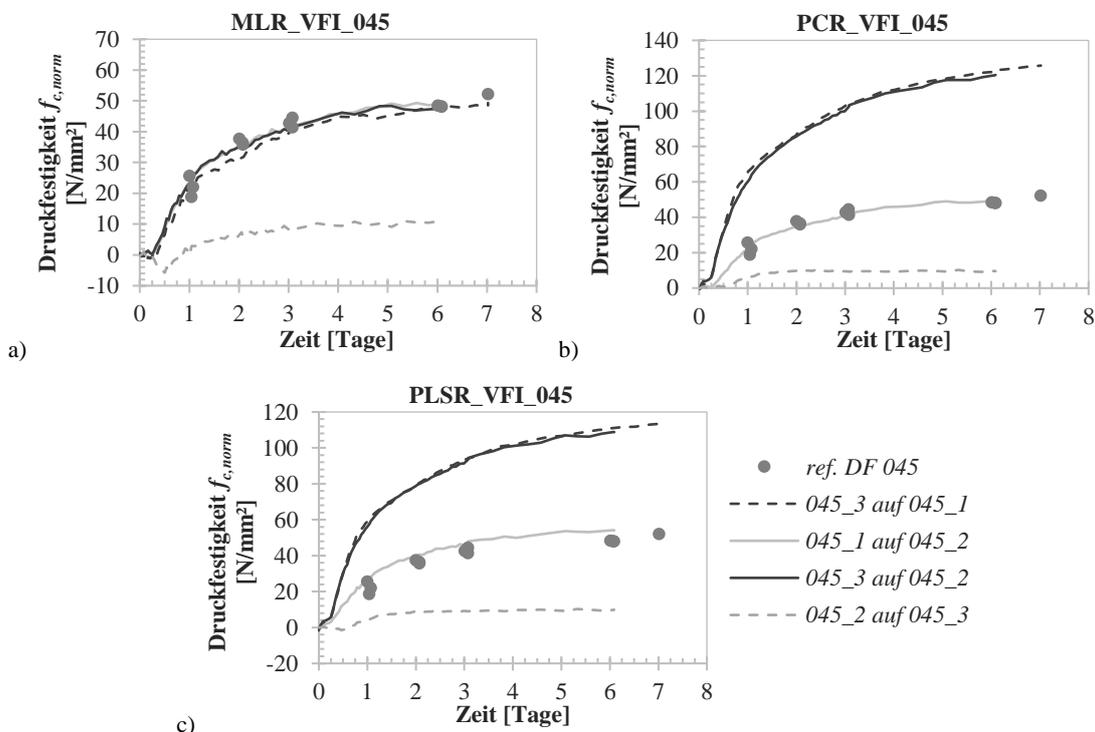


Abbildung 3.13: Beispielhafte Ergebnisse für die Anwendung der Verfahren MLR a), PCR b) und PLSR c) der Verläufe der Feuchteindizes ($w/z = 0,45$ und Sensor R2P).

Die erheblichen Abweichungen der vorhergesagten Druckfestigkeiten bei der Anwendung der multivariaten Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen (*_Para_* und *_VFI_*), können nach Meinung des Autors auf die Sensitivität der Koeffizienten der Berechnungsmodelle zurückgeführt werden. Bei der Aufstellung der Berechnungsmodelle werden die Koeffizienten (B) bestimmt (siehe Abschnitt 2.4.3). Bei der Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen kann es dazu kommen, dass die feststehende Wichtung der Koeffizienten fehlerhaft ist und es damit zu den genannten Abweichungen der vorhergesagten zu den ermittelten Druckfestigkeiten kommt.

Im Folgenden soll für die einparametrische Datenanalyse ein Berechnungsmodell aufgestellt werden. Einen Vergleich der multivariaten Berechnungsmodelle mit dem aufgestellten einparametrischen Berechnungsmodell und somit die Wahl des adäquaten Datenanalyseverfahrens und Sensors, erfolgt in Abschnitt 3.4.2.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit unterschiedlichen w/z-Werten können dem Anhang C.2 entnommen werden.

3.3.6 Kompensation von Temperatureinflüssen

Die dielektrischen Eigenschaften von Materialien sind temperaturabhängig. Bei einem konstanten Feuchtegehalt, aber unterschiedlichen Materialtemperaturen, ändern sich die Messdaten der Mikrowellentechnik [Kup1]. Gleichzeitig besitzen die Messdaten auch eine Abhängigkeit von der Temperatur der Messtechnik, wobei diese Abhängigkeit auf den Einfluss der Temperatur auf die Elektrotechnik der Sensoren zurückzuführen ist [Det1].

Bei der Untersuchung der Erhärtung zementgebundener Baustoffe soll ausschließlich die Änderung der Feuchteindizes infolge des Erhärtungsprozesses betrachtet werden. Dazu wurde der Einfluss der Sensor- bzw. Materialtemperatur auf die Messdaten der Mikrowellentechnik untersucht (siehe hierzu Abschnitt 3.2.2). Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchungen des Sensors R2P dargestellt und wenn nötig, Maßnahmen zur Kompensation der Temperatureinflüsse vorgeschlagen werden.

Abbildung 3.14 a) zeigt das Ergebnis der Untersuchung zur Abhängigkeit des Feuchteindex im Minimum von der Sensortemperatur. Dabei ist zu erkennen, dass deutliche Schwankungen der Feuchteindizes, abhängig von der Sensortemperatur, auftreten. In der Praxis sollten Sensortemperaturen von 20 °C nicht unterschritten werden, gleichzeitig überschreitet der Sensor im Normalbetrieb eine Temperatur von ca. 30 °C nicht [Kup1]. In diesem Temperaturbereich kann aus den Messwerten ein nahezu linearer Zusammenhang der Feuchteindizes im Kurvenminimum von der Temperatur des Sensors angenommen werden. Abbildung 3.14 b) zeigt diesen Zusammenhang, wobei mit steigender Sensortemperatur der Feuchteindex im Minimum der Messkurve fällt. Bei einer Temperatur des Sensors von 20 °C konnte ein Feuchteindex von ca. 34660, bei 30 °C ein Feuchteindex von ca. 34460 ermittelt werden. Die sensortemperaturabhängige Änderung des Messsignals bei konstanter Feuchte beträgt somit ca. 200 Einheiten (FI). Bei einer Änderung des Feuchteindex von ca. 5000 Einheiten während des Erhärtungsprozesses entspricht dies ca. 4,0 % der Gesamtänderung. Infolgedessen müssen in dem gewählten Temperaturbereich geeignete Kompensationsmaßnahmen getroffen werden.

Durch lineare Regression der Feuchteindizes, kann die folgende Gleichung 3.3 zur Kompensation der Sensortemperatur T_s dienen. Hierbei wird der gemessene Feuchteindex im Minimum $Min FI_{gem.}$ in den sensortemperaturkompensierten Feuchteindex $Min FI_s$ umgerechnet. Der Temperaturbezug des Sensors liegt bei 23 °C, wobei sich diese Temperatur im Sensor einstellt, wenn eine Umgebungstemperatur von ca. 20 °C herrscht.

$$Min FI_s = Min FI_{gem.} + 22,49 \cdot (T_s - 23) \quad 3.3$$

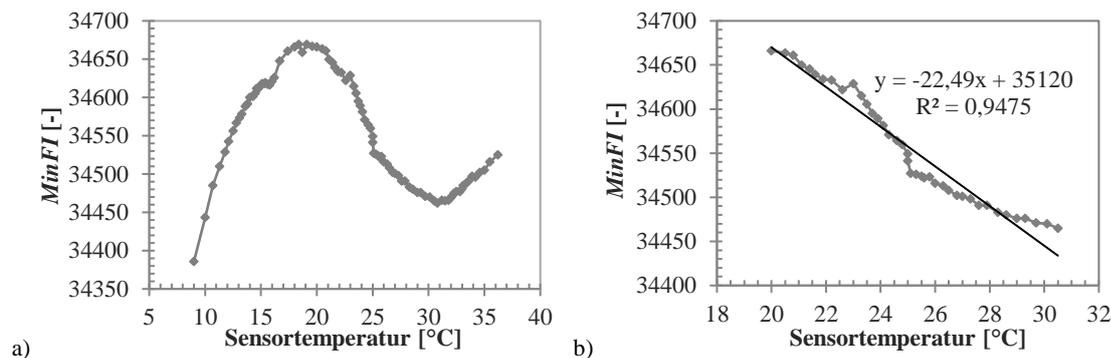


Abbildung 3.14: Abhängigkeit des Feuchteindex im Minimum von der Sensortemperatur a) und linearer Zusammenhang des Feuchteindex im Temperaturbereich von 20 bis 30 °C b).

Unterschiedliche Materialtemperaturen verändern die dielektrischen Eigenschaften des zu untersuchenden Baustoffs. Die relative Permittivität des Wassers fällt dabei zum Beispiel mit steigender Temperatur [Kup1], [Mou1]. In der Praxis können unterschiedliche minimale bzw. maximale Temperaturen auftreten. Die Temperatur eines Frischbetons kann dabei mit ca. 15 bis 25 °C abgeschätzt werden. Die in den eigenen Untersuchungen ermittelten Materialtemperaturen während des Erhärtungsprozesses von Beton betragen zwischen 20 und 35 °C.

Abbildung 3.15 a) zeigt das Ergebnis der Untersuchung des Einflusses der Materialtemperatur auf die Feuchteindizes im Kurvenminimum, wobei fallende Feuchteindizes mit zunehmender Materialtemperatur zu erkennen sind. Je kleiner der Feuchteindex ist, desto geringer ist die Permittivität des Materials. Dies belegten die oben getroffenen Aussagen zur fallenden relativen Permittivität des Wassers mit steigender Temperatur. Aus Abbildung 3.15 a) ist weiterhin zu entnehmen, dass bei einer Temperatur von 20 °C das untersuchte Material einen Feuchteindex von ca. 31850 besitzt. Wird die Materialtemperatur um 15 K erhöht, so wird ein Feuchteindex von ca. 31400 gemessen. Bei einer Änderung des Feuchteindex von ca. 5000 Einheiten während des Erhärtungsprozesses entspricht dies ca. 9,0 % der Gesamtänderung. Es müssen somit geeignete Kompensationsmaßnahmen getroffen werden.

Wird der Materialtemperaturbereich auf 20 bis 35 °C begrenzt, so ergibt sich eine nahezu lineare Änderung der Feuchteindizes im Minimum mit der Änderung der Materialtemperatur T_M (Abbildung 3.15 b)). Eine lineare Regression mit Hilfe der Gleichung 3.4 ist somit möglich, hierbei wird der gemessene Feuchteindex im Minimum $MinFI_{gem.}$ in den materialtemperaturkompensierten Feuchteindex $MinFI_M$ umgerechnet. Die Bezugstemperatur des Materials liegt dabei bei 20 °C¹⁰.

¹⁰ Dies entspricht der Temperatur bei einer Lagerung von Probekörpern im Normklima (DIN EN 12390-2).

$$Min FI_M = Min FI_{gem.} + 30,999 \cdot (T_M - 20) \quad 3.4$$

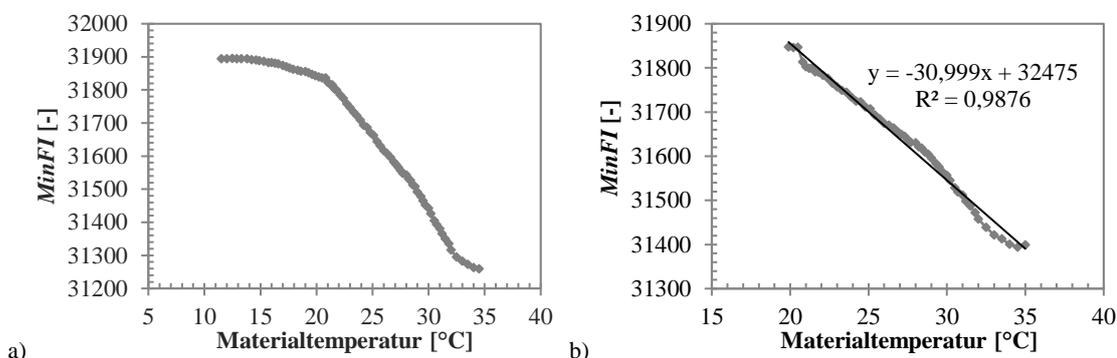


Abbildung 3.15: Abhängigkeit des Feuchteindex im Minimum von der Materialtemperatur a) und linearer Zusammenhang des Feuchteindex im Minimum im Temperaturbereich von 20 bis 35 °C b).

Die Untersuchung der Einflüsse aus Sensor- und Materialtemperatur auf die Messdaten der Mikrowellentechnik hat gezeigt, dass für beide Größen Kompensationsmaßnahmen getroffen werden müssen. So fallen die Feuchteindizes im Scheitelpunkt der Resonanzkurve mit zunehmender Sensor- bzw. Materialtemperatur um ca. 200 Einheiten (Sensortemperatur: 20 auf 30 °C) und ca. 450 Einheiten (Materialtemperatur: 20 auf 35 °C). Es konnte ein linearer Zusammenhang der Sensor- und Materialtemperatur mit den Feuchteindizes festgestellt und durch eine Geradengleichung approximiert werden. Diese Zusammenhänge sollen im Folgenden zusammengeführt werden.

Eine Kompensation von Einflüssen der Sensortemperatur T_s und Materialtemperatur T_M auf den Feuchteindex der Mikrowellentechnik kann so mit der folgenden Gleichung 3.5 vorgenommen werden. Der sensor- und materialtemperaturkompensierte Feuchteindex $Min FI$ wird dabei aus den gemessenen Feuchteindizes im Minimum $Min FI_{gem.}$ und den oben genannten Gleichungen berechnet.

$$Min FI = Min FI_{gem.} + \underbrace{22,49 \cdot (T_s - 23)}_{\text{Sensortemperatur}} + \underbrace{30,999 \cdot (T_M - 20)}_{\text{Materialtemperatur}} \quad 3.5$$

Kompensation: Sensortemperatur Materialtemperatur

Eine Extrapolation der Feuchteindizes für höhere Materialtemperaturen als 35 °C ist dabei nicht empfehlenswert, da der in diesem Temperaturbereich gefundene lineare Zusammenhang des Feuchteindex im Minimum und der Materialtemperatur nicht für andere Temperaturbereiche gültig sein muss.

3.4 Berechnungsmodell zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Beton

Im folgenden Abschnitt wird das Berechnungsmodell für die einparametrische Auswertung der Untersuchungen aufgestellt und mit den mehrparametrischen Modellen verglichen. Aus diesem Vergleich soll die adäquate Kombination aus Datenanalyseverfahren und Sensor zur Abbildung der Druckfestigkeit erarbeitet werden. Das gewählte Berechnungsmodell wird im Weiteren auf unterschiedliche Betonzusammensetzungen und in zwei Feldversuchen angewendet.

3.4.1 Aufstellung des Berechnungsmodells für das einparametrische Verfahren

Auf Grundlage der größeren Abhängigkeit von der Druckfestigkeit sowie reproduzierbarer Verläufe in den Parametern, wurde bei der einparametrischen Auswertung der Untersuchungen der Sensor R2P gewählt (siehe Abschnitt 3.3.3). Gleichzeitig stellte sich bei der Analyse der Untersuchungen zur Abhängigkeit der Parameter von der Druckfestigkeit heraus, dass die Änderung der Feuchteindizes im Minimum der Messkurve $\Delta MinFI$ einen direkten Zusammenhang mit der Druckfestigkeit, unabhängig vom w/z-Wert, besitzt. Dies soll im Folgenden zur Aufstellung des einparametrischen Berechnungsmodells genutzt werden (siehe auch [Dol1]).

Der direkte Zusammenhang kann allgemein mit Hilfe der Gleichung 3.6 beschrieben werden, wobei die normierte Druckfestigkeit $f_{c,norm}$ in Abhängigkeit von der Änderung des Feuchteindex im Minimum $\Delta MinFI$ und den anzupassenden Faktoren A , B und C berechnet wird.

Die erarbeiteten Maßnahmen zur Kompensation der Sensor- und Materialtemperatur (siehe Abschnitt 3.3.6) wurden auf die Feuchteindizes angewendet.

Der Aufbau der genutzten Funktion ähnelt dabei der Gleichung 2.14, welche zur Beschreibung des Erhärtungsprozesses genutzt wird. Zur Erhöhung der Genauigkeit der berechneten Druckfestigkeiten aus den Mikrowellendaten wurde ein lineares Glied ergänzt¹¹.

$$f_{c,norm}(\Delta MinFI) = A \cdot e^{-150 \cdot \left(\frac{\Delta MinFI \cdot 0,2}{135} \right)^B} + C \cdot \Delta MinFI \quad 3.6$$

¹¹ Die in das Berechnungsmodell aufgenommenen Zahlenwerte stellen vom Autor empirisch ermittelte Faktoren dar, welche bei der Aufstellung des Berechnungsmodells keinen signifikanten Einfluss hatten und aus Gründen der Übersichtlichkeit fixiert wurden.

Werden die Faktoren A , B und C aus den Messwerten der eigenen Untersuchungen mit Hilfe einer Regressionsanalyse extrahiert, so ergibt sich Gleichung 3.7.

$$f_{c, norm}(\Delta MinFI) = 38,20 \cdot e^{-150 \cdot \left(\frac{\Delta MinFI \cdot 0,2}{135} \right)^{-2,71}} + 0,0038 \cdot \Delta MinFI \quad 3.7$$

Die Messwerte entstammen dabei den Versuchsreihen 045_3 und 050_1 , welche als Repräsentanten und somit mittlere Messkurven der neun Versuchsreihen unter Variation der w/z-Werte dienen (siehe hierzu auch Abschnitt 3.3.3). Eine Gegenüberstellung dieser Funktion mit den Messwerten zeigt Abbildung 3.16, wobei eine hohe Übereinstimmung des Berechnungsmodells mit den Messwerten der Versuchsreihen zu erkennen ist. Eine Gegenüberstellung des Berechnungsmodells mit den weiteren Versuchsreihen erfolgte bereits in Abschnitt 3.3.4.

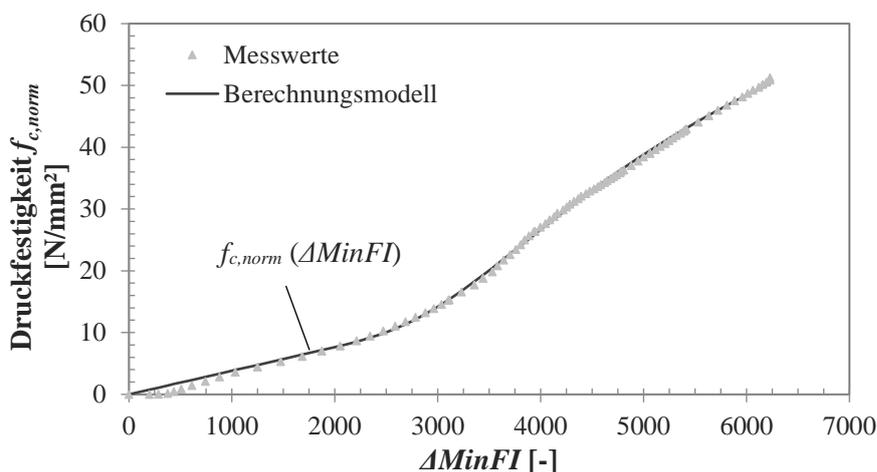


Abbildung 3.16: Vergleich der Ergebnisse des einparametrischen Berechnungsmodells mit den Messwerten aus den Versuchsreihen.

3.4.2 Auswahl von Analyseverfahren und Sensor

Ziel des Vergleichs der Analyseverfahren ist es, ein adäquates Verfahren (einparametrisch oder multivariat) zur Auswertung der Mikrowellensignale auszuwählen, zugleich soll die Wahl des optimalen Sensors erfolgen. Der Vergleich der Genauigkeit der unterschiedlichen Analyseverfahren erfolgt dabei an den Anwendungen der Berechnungsmodelle der Einzelversuche auf die Wiederholungsmessungen (Validierung).

Die Aufstellung des Berechnungsmodells für das einparametrische Verfahren wurde im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Die Modelle der mehrparametrischen Verfahren wurden bereits im Abschnitt 3.3.5 zur Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und verwendet.

In Tabelle 3.7 sind die Ergebnisse des Vergleiches der Verfahren und Sensoren dargestellt, wobei für jedes Verfahren und jeden Sensor die Druckfestigkeiten berechnet sowie die Abweichungen der Modelle zu den Referenzwerten aufgelistet wurden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es bei den multivariaten Modellen zu größeren Abweichungen der berechneten von den Referenzwerten kommt. Gerade die Modelle des Sensors PP unter Nutzung der Verläufe der Feuchteindizes ($_VFI$) zeigen hohe mittlere und maximale Fehler, aber auch die mehrparametrischen Modelle der Parameter ($_Para$) sind deutlich ungenauer als das einparametrische Modell. Die Ergebnisse des einparametrischen Modells zeigen insgesamt kleine mittlere und maximale Fehler bei der Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Analyse der Sensor- und Verfahrensgenauigkeit anhand des mittleren- und maximalen Fehlers der berechneten Druckfestigkeiten bei der Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen.

Kriterium		mittlerer Fehler [N/mm ²]			maximaler Fehler [N/mm ²]		
		R2P	PP	Koax	R2P	PP	Koax
Einparametrische Datenanalyse	$\Delta MinFI$	2,02	/	/	5,92	/	/
	MLR_Para	6,44	16,46	/	20,94	56,35	/
Multivariate Datenanalyse	MLR_VFI	6,14	39,58	14,01	39,12	95,39	56,16
	PCR_Para	5,55	9,56	/	20,94	33,34	/
	PCR_VFI	11,77	39,37	12,37	75,12	96,84	39,88
	PLSR_Para	5,29	11,41	/	19,78	32,83	/
	PLSR_VFI	12,96	29,84	13,32	62,99	81,85	42,01

Der Vergleich der Analyseverfahren und Sensoren zeigt somit, dass das einparametrische Verfahren und der Sensor R2P die adäquate Kombination zur Berechnung der Druckfestigkeit aus den Mikrowellendaten ist. Demgegenüber liefern die multivariaten Modelle der Parameter und der Verläufe der Feuchteindizes deutliche Abweichungen, sodass eine Aussage zur Druckfestigkeitsentwicklung des Betons kaum möglich ist.

Das aufgestellte einparametrische Modell in Kombination mit dem Sensor R2P wird demzufolge in den weiteren Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Mikrowellenverfahren und in Feldversuchen eingesetzt. Dieses Vorgehen soll zur Validierung des funktionellen Zusammenhangs der Gleichung 3.7 dienen.

3.4.3 Anwendung des einparametrischen Berechnungsmodells auf verschiedene Betonzusammensetzungen

Zur Validierung des aufgestellten Berechnungsmodells erfolgten Untersuchungen mit verschiedenen Betonzusammensetzungen. Es kamen unterschiedliche Zementarten (CEM I, CEM II und CEM III), Betonzusatzmittel (Fließmittel FM und Luftporenbildner LP), verschiedene Zementmengen des CEM I und unterschiedlichen Gesteinskörnungsmengen zum Einsatz (siehe Tabelle 3.1 und 3.2).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt (siehe auch [Dol1]). Hierbei werden die ermittelten Druckfestigkeiten in Abhängigkeit zur Änderung des Feuchteindex im Minimum ($\Delta MinFI$) für die unterschiedlichen Betonzusammensetzungen und dem aufgestellten Berechnungsmodell vergleichend dargestellt.

Einfluss der Zementart

Die Untersuchung zum Einfluss der Zementart erfolgte mit den gängigen Hauptzementarten CEM I, CEM II und CEM III, wobei Zemente mit unterschiedlichen Zumahlstoffen und auch verschiedenen Mahlfineinheiten zum Einsatz kamen (siehe Tabelle 3.2). Die Zementmenge betrug dabei 400 kg/m^3 Beton.

Abbildung 3.17 zeigt die Ergebnisse von jeweils zwei Versuchsreihen (_1 und _2) des CEM II a) und des CEM III b) im Vergleich zum aufgestellten Berechnungsmodell (CEM I), wobei nur geringe Unterschiede der Versuchsreihen im Vergleich zum Berechnungsmodell zu erkennen sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen verdeutlichen, dass ein direkter Zusammenhang der Druckfestigkeit mit der Änderung des Feuchteindex im Minimum unabhängig von der Zementart existiert. Dies lässt darauf schließen, dass die Zementart keinen signifikanten Einfluss auf die Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Betons während der Erhärtung hat.

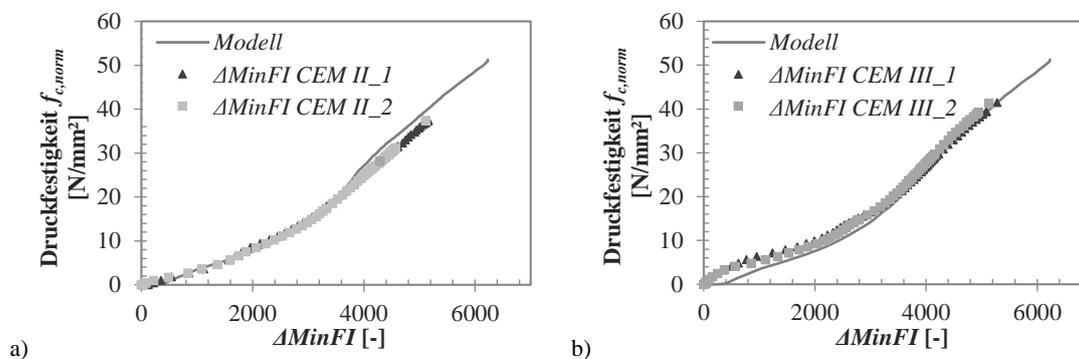


Abbildung 3.17: Vergleich der Versuchsreihen mit CEM II a) und CEM III b) mit dem Berechnungsmodell.

Einfluss der Zementmenge

Die Untersuchung unterschiedlicher Zementmengen erfolgte mit 360, 400 und 440 kg Zement pro Kubikmeter Beton, indes die Zementart (CEM I) und der w/z-Wert von 0,50 in den Untersuchungen konstant blieben.

In Abbildung 3.18 a) ist die Entwicklung der gemessenen Feuchteindizes während des Erhärtungsprozesses für die Versuchsreihen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der Änderung des Zementanteils auch eine Änderung der Feuchteindizes zu Beginn der Messung sichtbar wird. Mit größerem Zementanteil ist ein höherer Anteil an Wasser im Beton vorhanden, was dazu führt, dass der Feuchteindex höhere Werte annimmt. Die Änderung des Feuchteindex im Verlauf des Erhärtungsprozesses zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit von der eingesetzten Zementmenge. So führt ein größerer Zementanteil zu einer geringeren Änderung des Feuchteindex im Minimum.

Abbildung 3.18 b) zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen im Vergleich zum aufgestellten Berechnungsmodell, welches einen Zementanteil von 400 kg/m³ Beton besitzt. In den Ergebnissen spiegeln sich die beschriebenen Unterschiede in der Änderung des Parameters, abhängig vom Zementanteil, wider. Bei gleicher Druckfestigkeit ist bei einem größeren Zementanteil eine geringere Änderung des Parameters erkennbar.

Die geringere Änderung der Feuchteindizes bei größeren Zementanteilen kann damit erklärt werden, dass bei einem konstanten w/z-Wert mit steigendem Zementanteil auch die Anmachwassermenge größer wird. Im Verlauf des gesamten Erhärtungsprozesses wird ein konstanter Anteil des Wassers von ca. 25 M.-% chemisch und ca. 1,5 M.-% stark physikalisch (siehe Abschnitt 2.2.1 und 2.3.3) vom Zementanteil gebunden. Somit existiert eine Abstufung der Menge an Wasser, welche im Beton verbleibt (Tabelle 3.8). Gleichzeitig ändert sich der Anteil der Gesteinskörnung abhängig vom Zementanteil, wobei die Gesteinskörnung eine geringe Permittivität hat [Kup1], was sich bei höheren Zementanteilen und kleineren Mengen an Gesteinskörnung in einer geringeren Änderung der gemessenen Feuchteindizes widerspiegelt.

Zur Trennung der Einflüsse aus unterschiedlichen verbleibenden Wasseranteilen sowie Mengen an Gesteinskörnung, wurde die Versuchsreihe mit einem Zementanteil von 360 kg/m³ mit der gleichen Menge an Anmachwasser und Gesteinskörnung, wie das aufgestellte Modell, durchgeführt (Versuchsreihe 360_GK). Dabei konnte festgestellt werden, dass die Versuchsreihe 360_GK eine etwas geringere Änderung der Feuchteindizes im Vergleich zur Versuchsreihe 360 besitzt, dennoch deutlich größere Werte im Vergleich zum aufgestellten Berechnungsmodell. Es ist somit ein vergleichsweise geringer Einfluss der Gesteinskörnungsmenge (GK) festzustellen, der größere Einfluss

liegt bei der verbleibenden Wassermenge (VW) im Beton (siehe Abbildung 3.18 b)).

Zusammenfassend betrachtet, bewirkt ein größerer Zementanteil somit eine geringere Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Betons. Daraus ergeben sich die in Abbildung 3.18 b) dargestellten Ergebnisse der Versuchsreihen, bei welchen ein unterschiedliches Verhalten der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Änderung des Feuchteindex festgestellt wurde. Es müssen somit, abhängig von der eingesetzten Menge an Zement, die Faktoren *A*, *B* und *C* des Berechnungsmodells angepasst werden.

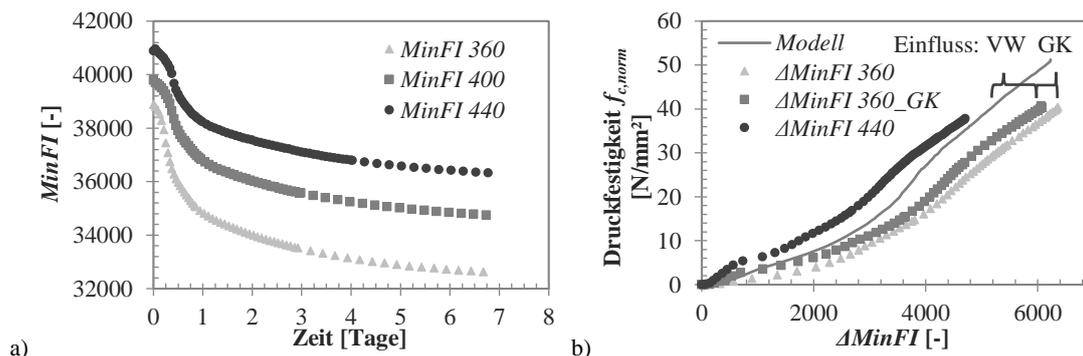


Abbildung 3.18: Unterschiede in den Feuchteindizes zu Beginn der Messung a) und Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Änderung der Feuchteindizes b) für Zementmengen von 360, 400 (Modell) und 440 kg/m³.

Tabelle 3.8: Anteil der gesamten chemischen Wasserbindung während des Erhärtungsprozesses und verbleibendes Wasser im Beton.

Bezeichnung	Zement [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	Gesteinskörnung [kg/m ³]	Wasserbindung (26,5 % v. Z.) [kg/m ³]	verbleibendes Wasser im Beton [kg/m ³]
360	360	180	1826	95,4	84,6
360_GK	360	180	1738	95,4	84,6
Modell	400	200	1738	106,0	94,0
440	440	220	1651	116,6	103,4

Einfluss von Betonzusatzmitteln

Zur Untersuchung des Einflusses von Betonzusatzmitteln auf das Berechnungsmodell kamen Fließmittel und Luftporenbildner zum Einsatz. Aufgrund der zu erwartenden Konsistenzänderung wurden die Versuchsreihen mit dem Fließmittel mit einem w/z-Wert von 0,45 hergestellt und im Weiteren auch mit den Versuchsreihen ohne Fließmittel und dem gleichen w/z-Wert verglichen. In den Versuchsreihen mit dem Luftporenbildner wurden ein w/z-Wert von 0,50 genutzt und zwei verschiedene Anteile an Frischbetonluftporen von im Mittel 5,0 Vol.-% (*LP_1* und *LP_2*) sowie 8,0 Vol.-% (*LP_3* und *LP_4*) hergestellt. Die Zementmenge betrug erneut 400 kg/m³ Beton.

Abbildung 3.19 a) zeigt den Vergleich der Versuchsreihen mit und ohne Fließmittel. Dabei ist zu erkennen, dass die Versuchsreihen mit im Vergleich zu denen ohne Fließmittel einen ähnlichen Verlauf besitzen. Der unmittelbare Zusammenhang der Druckfestigkeit mit der Änderung des Feuchteindex im Minimum wird deutlich, gleichzeitig zeigt sich in den Versuchsreihen mit Fließmittel jedoch eine etwas geringere Änderungen des Feuchteindex bei gleicher Druckfestigkeit des Betons.

Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass ein Fließmittel auf Polycarboxylat-ether-Basis (PCE) eingesetzt wurde. Dieser PCE besitzt polarisierbare Anteile, wodurch der Feuchteindex im Minimum höhere Werte zeigt und somit die Änderung des Feuchteindex geringer ausfällt. Gleichzeitig ändert sich auch die Wasserbindung des Betons, welches ebenfalls Auswirkungen auf die Änderung des Feuchteindex zur Folge hat. Das aufgestellte Berechnungsmodell muss somit an den Anteil des Fließmittels angepasst werden.

Abbildung 3.19 b) zeigt den Vergleich der Versuchsreihen mit und ohne Luftporenbildner. Wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, wurden die ermittelten Druckfestigkeiten dabei auf einen Standardluftporengehalt von 1,5 Vol.-% normiert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Versuchsreihen mit einem Luftporengehalt von ca. 5,0 Vol.-% im Vergleich mit dem Berechnungsmodell, nur geringe Abweichungen zu erkennen sind. Die Versuchsreihen mit Luftporengehalt von ca. 8,0 Vol.-% zeigen bei gleicher Druckfestigkeit eine größere Änderung der Feuchteindizes im Vergleich mit dem Berechnungsmodell.

Dies kann damit erklärt werden, dass die während der Erhärtung entstehenden zusätzlichen Luftporen des Betons die effektive Permittivität¹² senken. Die Feuchteindizes zeigen somit eine größere Änderung mit zunehmendem Luftporengehalt.

Für die Anwendung von Berechnungsmodellen bedeutet dies, dass eine Aufstellung eines separaten Berechnungsmodells möglicherweise erst ab ca. 5,0 Vol.-% Frischbetonluftporen erfolgen muss. Für Frischbetonluftporengehalte größer als 5,0 Vol.-% wird hingegen eine Aufstellung separater Berechnungsmodelle nötig.

¹² Die relative Permittivität von Luft ($\epsilon_r \approx 1$) entspricht der des Vakuums.

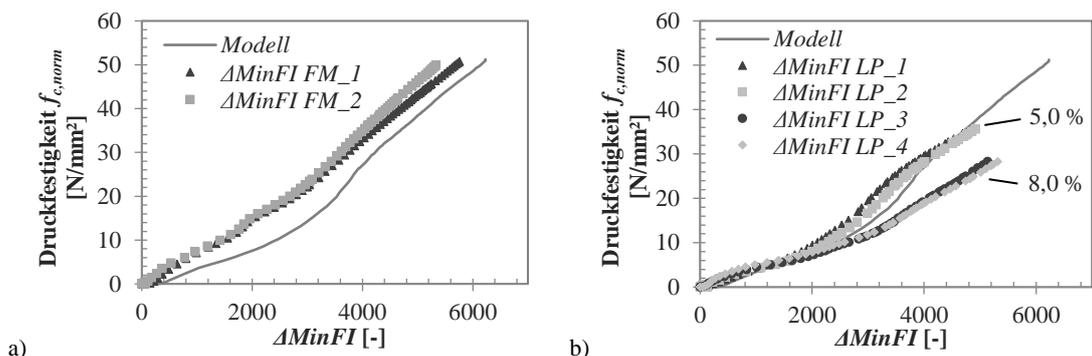


Abbildung 3.19: Vergleich der Versuchsreihen mit Fließmittel a) und Luftporenbildner b) mit dem Berechnungsmodell.

Zusammenfassung

Die Versuchsreihen mit verschiedenen Zementmengen, unter Einsatz eines Fließmittels (PCE) und einem erhöhten Luftporengehalt (ab ca. 5,0 Vol.-%) haben Abweichungen vom aufgestellten Berechnungsmodell gezeigt. Werden die Faktoren *A*, *B* und *C* des Berechnungsmodells durch eine Regressionsanalyse angepasst, so können auch diese Einflüsse auf die Änderung des Feuchteindex im Minimum kompensiert werden (Tabelle 3.9).

Dabei wird eine Abstufung des jeweiligen Faktors mit beispielsweise dem Zementgehalt sichtbar. Der Faktor *A* fällt mit zunehmender Zementmenge, die Faktoren *B* und *C* werden mit dem Anstieg der Zementmenge größer. Dies macht eine Interpolation von Zwischenwerten der Mengenanteile möglich, gleichzeitig könnte auch für unterschiedliche Mengen an Fließmittel oder Luftporenbildner eine Interpolation der Werte möglich sein.

Tabelle 3.9: Faktoren des Berechnungsmodells für unterschiedliche Betonzusammensetzungen.

Variation	Faktoren		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
w/z-Wert	38,20	-2,71	0,0038
Zementart			0,0071
Fließmittel (0,5 % v. Z.)	15,30		0,0038
Luftporenbildner (<i>LP_1</i> & <i>LP_2</i>)	38,20	-2,58	0,0036
Luftporenbildner (<i>LP_3</i> & <i>LP_4</i>)	19,18		0,0025
Zementmenge 360 kg/m ³	43,40	-3,08	0,0057
Zementmenge 440 kg/m ³	16,17		

3.4.4 Praxisanwendung des Verfahrens

Nachdem das Verfahren zur Ermittlung der Druckfestigkeit aus der Messung der Mikrowellensignale unter Laborbedingungen erprobt wurde, erfolgte eine Anwendung des Verfahrens in Feldversuchen. In zwei Betonfertigteilwerken konnte innerhalb unterschiedlicher Messzeiträume und an verschiedenen Betonzusammensetzungen das Verfahren eingesetzt werden. Auf eine detaillierte Angabe der Betonzusammensetzungen wird im Weiteren aus Datenschutzgründen verzichtet.

Betonfertigteilwerk 1

Im ersten Fertigteilwerk konnte das Verfahren in zwei Versuchsreihen¹³ über einen Messzeitraum von ca. 21 Stunden eingesetzt werden, wobei in den verwendeten Betonzusammensetzungen neben Fließmittel auch Steinkohlenflugasche und gebrochene Gesteinskörnung enthalten war. Über den festgelegten Zeitraum konnten insgesamt 41 Einzelmessungen für eine Versuchsreihe in einem Intervall von 30 Minuten durchgeführt werden. Die Applikation des Sensors (R2P) erfolgte dabei direkt in die Schalung eines Fertigteils (Abbildung 3.20). Parallel zur Betonage des Fertigteils, wurden Probekörper zur Ermittlung des Druckfestigkeitsverlaufes hergestellt, welche neben dem zu untersuchenden Bauteil gelagert wurden. Die Temperatur im Umfeld der Betonage lag im Mittel bei ca. 12 °C. Auf eine Messung der Betontemperatur im Fertigteil musste verzichtet werden.



Abbildung 3.20: Applikation der Sensortechnik im Fertigteilwerk 1.

¹³ Die Versuchsreihen wurden an gleichen Bauteilen mit identischer Betonzusammensetzung, allerdings an zwei aufeinanderfolgenden Tagen bzw. Betonagen durchgeführt.

Aus den ermittelten Druckfestigkeiten und den Mikrowellenmessdaten der zwei Versuchsreihen konnte ein Berechnungsmodell erstellt werden, wobei auf eine Kompensation der Materialtemperatur verzichtet werden musste. Unter Anpassung der Faktoren A , B und C der Gleichung 3.6 war es möglich, die Entwicklung der Druckfestigkeit innerhalb des ersten Tages nach der Betonage nachzuvollziehen.

In Abbildung 3.21 ist das aufgestellte Berechnungsmodell mit der gemessenen Änderung der Feuchtindizes der Mikrowellensensoren ($\Delta MinFI$) mit Bezug zur Druckfestigkeitsentwicklung und den nach ca. 24 Stunden ermittelten Referenzdruckfestigkeiten des Betons (*Ref.*) dargestellt. Dabei wird der typische Verlauf des Erhärtungsprozesses mit der Ruhe- und Akzelerationsperiode sichtbar (siehe Abschnitt 2.2.1). Ferner wird mit dem aufgestellten Modell auch die Größenordnung der Druckfestigkeiten der Referenzwerte erreicht, wobei nach 24 Stunden eine Abweichung von ca. 2,0 N/mm² aufgetreten ist. Diese Abweichung entspricht der Genauigkeit, welche in den eigenen Untersuchungen ermittelt wurde (siehe Anhang A.3) und kann somit bei einer Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton als ausreichend gewertet werden.

Werden die Ergebnisse der Untersuchung im Fertigteilwerk 1 mit dem im Abschnitt 3.4.1 vorgestellten Berechnungsmodell für die Laborversuche verglichen (Abbildung 3.21), so wird deutlich, dass es zu einer größeren Änderung des Feuchteindex in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Vergleich zum Berechnungsmodell der Laborversuche kam. Diese größere Änderung des Parameters $\Delta MinFI$ kann damit erklärt werden, dass der Einsatz von Flugasche und gebrochener Gesteinskörnung eine große Wasserbindung zur Folge hat und es somit auch zu einer größeren Änderung des Feuchteindex der Mikrowellenmessung während des Erhärtungsprozesses kommt.

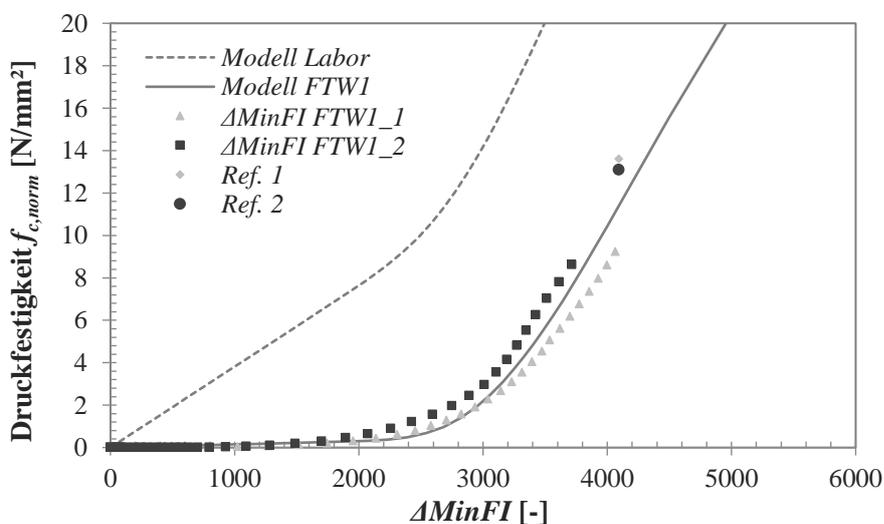


Abbildung 3.21: Ergebnisse der Untersuchung im Fertigteilwerk 1 (FTW1).

Betonfertigteilwerk 2

Im zweiten Fertigteilwerk konnte die Mikrowellenmesstechnik über einen Zeitraum von 7 Tagen zur Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton angewendet werden. Die Temperatur im Umfeld der Untersuchung lag dabei bei ca. 23 °C. Das Vorgehen zur Herstellung separater Probekörper und die Verknüpfung der Mikrowellendaten mit den ermittelten Druckfestigkeiten ähnelt dabei dem des ersten Feldversuches. Jedoch konnte die Materialtemperatur messtechnisch erfasst und später in der Auswertung kompensiert werden. Zur Aufstellung des Berechnungsmodells konnte im zweiten Fertigteilwerk nur eine Versuchsreihe durchgeführt und genutzt werden. Die Betonrezeptur besaß dabei einen sehr niedrigen w/z-Wert und es kam ein Fließmittel (FM) sowie ein Dichtungsmittel (DM) zum Einsatz.



Abbildung 3.22: Messtechnik und Referenzprobekörper im Fertigteilwerk 2.

Abbildung 3.23 zeigt das aufgestellte Berechnungsmodell mit den Messdaten des Mikrowellensensors ($\Delta MinFI$) mit Bezug zur Druckfestigkeitsentwicklung und den Referenzdruckfestigkeiten (*Ref.*) des Betons nach 12 Stunden sowie 1, 3, 4 und 6 Tagen. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Druckfestigkeitsentwicklung des Betons gut nachvollzogen werden konnte. Der mittlere Fehler des aufgestellten Berechnungsmodells im Bezug zu den Referenzwerten beträgt ca. 2,1 N/mm² und liegt somit erneut in der Genauigkeit der eigenen Untersuchungen (siehe Anhang A.3).

Im Vergleich zum Berechnungsmodell der Laborversuche sind etwas geringere Änderungen des Feuchteindex in Abhängigkeit zur Druckfestigkeit zu erkennen. Dies ist nach Meinung des Autors, auf den Einfluss der Zusatzmittel (FM und DM) zurückzuführen.

Die Faktoren A , B und C der aufgestellten Berechnungsmodelle für beide Fertigteilwerke sind in Tabelle 3.10 aufgelistet.

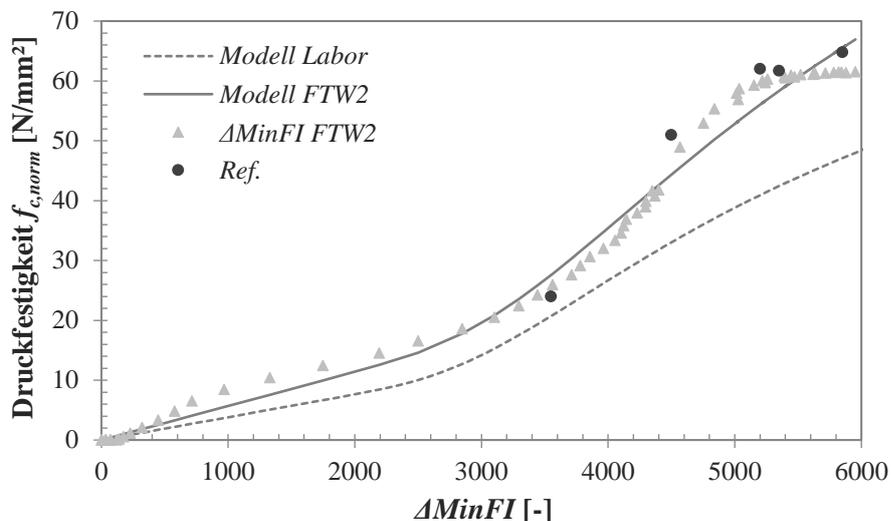


Abbildung 3.23: Ergebnisse der Untersuchung im Fertigteilwerk 2 (FTW2).

Tabelle 3.10: Faktoren der Berechnungsmodelle für die Feldversuche.

Anwendung	Faktoren		
	A	B	C
Fertigteilwerk 1	48,80	-2,55	0,0001
Fertigteilwerk 2	56,30	-2,59	0,0057

3.4.5 Genauigkeit der Berechnungsmodelle

Mit Hilfe der Gleichung 3.6 und unter Anpassung der Faktoren A , B und C wurden Berechnungsmodelle abhängig von der Betonzusammensetzung erarbeitet. Mit Hilfe der Referenzdruckfestigkeiten kann im Weiteren auf die Genauigkeit dieser Modelle geschlossen werden.

Die Genauigkeit der aufgestellten Berechnungsmodelle wird dabei statistisch mit Hilfe eines sogenannten Vertrauens- oder Konfidenzintervalls, bestehend aus einem Konfidenzniveau und einem Konfidenzbereich, ausgedrückt. Der Konfidenzbereich gibt dabei Auskunft, wie groß die Abweichungen der berechneten Werte vom Referenzwert sind. Das Konfidenzniveau beschreibt den Anteil der berechneten Werte, welche in diesem Bereich liegen.

Für die aufgestellten Berechnungsmodelle mit einer Grundgesamtheit von 1515 berechneten Werten konnte mit einem Anteil von 95 % der berechneten Werte eine Genauigkeit von $\pm 4,5$ N/mm² erreicht werden (Abbildung 3.24). Wird der Bereich auf $\pm 2,0$ N/mm² eingeschränkt, so verringert sich der Anteil auf 70 %.

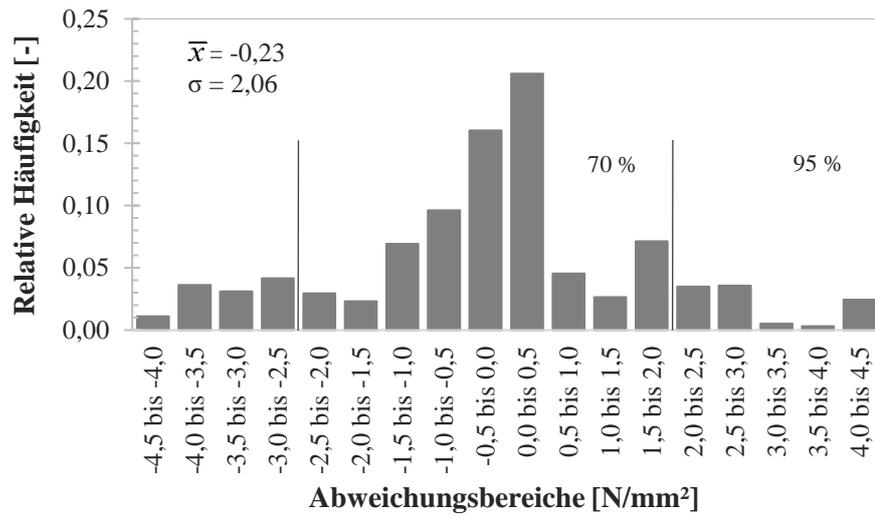


Abbildung 3.24: Verteilung der Häufigkeit für festgelegte Abweichungsbereiche.

3.5 Zusammenfassung

Die Untersuchung des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe hat gezeigt, dass die Verknüpfung der Mikrowellendaten mit der Druckfestigkeit des Betons über eine einparametrische Auswertung ausreichend zur Charakterisierung des Erhärtungsprozesses ist. Die multivariate Auswertung der Messdaten hat demgegenüber eine deutliche Abweichung der prognostizierten Werte bei der Anwendung der Berechnungsmodelle auf die Wiederholungsmessungen gezeigt, was dazu führt, dass eine Aussage zur Druckfestigkeitsentwicklung kaum möglich ist.

Die Ergebnisse der einparametrischen Auswertung der Messdaten haben Zusammenhänge der dielektrischen Eigenschaften des erhärtenden Betons mit dem w/z-Wert vor allem aber mit der Druckfestigkeitsentwicklung gezeigt. Diese in den eigenen Untersuchungen dargestellten Korrelationen bestätigen die in den vorangegangenen Arbeiten von [Sha1], [Jam1] und [She1] getroffenen Aussagen. Weitergehend konnte aus der Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Sensoren und der Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess der Sensor R2P (Streifeld-Resonator) in Kombination mit dem Parameter $\Delta MinFI$ identifiziert werden, welcher im Weiteren zur Aufstellung von Berechnungsmodellen diene.

Neben dem Erhärtungsprozess wurden Einflüsse der Sensor- bzw. Materialtemperatur auf die Sensortechnik untersucht. Für diese Einflüsse konnte eine Korrekturformel für die Messdaten der Mikrowellentechnik erarbeitet werden, wobei ein Temperaturbereich von 20 bis 35 °C angesetzt wurde.

Die Anwendung des Verfahrens auf verschiedene Betonzusammensetzungen zeigte Einflüsse auf das Berechnungsmodell, welche durch die Anpassung der Faktoren A , B und C der Gleichung 3.6 kompensiert werden konnten. Zusammenfassend können die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf die Messung der dielektrischen Eigenschaften bei den durchgeführten Versuchsreihen wie folgt dargestellt werden:

ohne signifikanten Einfluss bei sonst konstanter Mischungszusammensetzung:

- w/z-Wert
- Zementart
- Frischbetonluftporengehalte bis ca. 5,0 Vol.-%

mit Einfluss:

- Zementmenge (verbleibende Wassermenge im Beton)
- Fließmittel
- Frischbetonluftporengehalte ab ca. 5,0 Vol.-%
- Gesteinskörnungsanteile

In Feldversuchen wurde das Verfahren erfolgreich angewendet. Es kann im Weiteren zur Überwachung der Druckfestigkeitsentwicklung im Labor oder direkt auf der Baustelle (in die Schalung integriert) angewendet werden, wo es zum Beispiel zur Festlegung von Ausschulungsfristen dient. Dazu müsste vor der praktischen Anwendung des Verfahrens für jede neue Betonzusammensetzung ein separates Berechnungsmodell aufgestellt werden. Gleichzeitig ist, um Temperatureinflüsse kompensieren zu können, eine Messung der Sensor- und Materialtemperatur nötig. Die aufgestellten Berechnungsmodelle besitzen dabei eine ausreichende Genauigkeit, es kann für die eigenen Untersuchungen eine maximale Abweichung von $\pm 4,5 \text{ N/mm}^2$ für 95 % der berechneten Werte angegeben werden.

Aus der Untersuchung des Erhärtungsprozesses können Einflüsse der Wasserbindung auf die folgenden Untersuchungen zum kombinierten Prozess aus Erhärtung und Trocknung übertragen werden. Der zementgebundene Baustoff bindet während des Erhärtungsprozesses Wasseranteile chemisch, dies sorgt dafür, dass bei der zerstörungsfreien, aber auch zerstörenden Messung des Feuchtegehaltes, Einflüsse des Hydratationsprozesses auftreten. Gleichzeitig ändern sich die dielektrischen Eigenschaften des Materials abhängig von der Erhärtung und der Trocknung. Diese Aspekte sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

4 Untersuchung des kombinierten Erhärtungs- und Trocknungsprozesses

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungen des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe vorgestellt. Dabei gliedert sich das Kapitel in die Versuchsdurchführung, die Auswertung sowie Diskussion der Untersuchungen und die Aufstellung und Anwendung eines Berechnungsmodells.

4.1 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung des kombinierten Prozesses kam ein Zementestrich zum Einsatz. Es wurden insgesamt 10 Versuchsreihen mit unterschiedlichen Geometrien der Probekörper und verschiedenen klimatischen Verhältnissen durchgeführt, wobei neben der Mikrowellentechnik die zerstörenden Feuchtemessmethoden wie die Darr- und CM-Methode zur Anwendung kamen. Als Referenzwert für das Mikrowellenverfahren diente die Darr-Feuchte. Parallel zur Untersuchung des Trocknungsverlaufes wurde das Erhärtungsverhalten des Estrichs betrachtet. Dazu wurden separate Proben zur Bestimmung der Druckfestigkeitsentwicklung hergestellt und eine Untersuchung von versiegelten Estrichproben mit der Mikrowellentechnik durchgeführt. Zusätzlich zu den genannten, erfolgten Untersuchungen zum Einfluss der Darr-Trocknungstemperatur und zur Wasseraufnahme des Estrichs.

Eine Übersicht der Versuchsreihen mit dem Versuchsaufbau, den Probekörpergeometrien, der Anzahl der Versuchsreihen und den jeweiligen Vergleichswerten kann der folgenden Tabelle 4.1 entnommen werden.

Tabelle 4.1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung.

Versuche	Versuchsaufbau	Probekörpergröße	Anzahl Versuchsreihen	Vergleichswerte
Erhärtungsprozess + Trocknung	Mikrowellensensor R2	200 · 200 · 50 mm ³	1	Feuchte (Darr & CM) + Druckfestigkeit
		200 · 200 · 70 mm ³	1	
		400 · 400 · 40 mm ³	2	
		400 · 400 · 60 mm ³	2	
		400 · 400 · 80 mm ³	2	
Darr-Trocknungstemperatur	(diskontinuierlich)	200 · 200 · 50 mm ³	1	Feuchte (Darr & CM)
Wasseraufnahme		200 · 200 · 50 mm ³	1	Feuchte (Darr)

4.1.1 Versuchsaufbau und verwendetes Material

Die Untersuchung der Prozesse aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe erfolgte an quadratischen Zementestrichplatten. Hierbei wurde ein Estrich auf Trenn- bzw. Dämmschicht nachgebildet, indes eine Feuchteabgabe der Proben damit nur auf der oberen Fläche möglich war. Da die Feuchtemessung mit dem Mikrowellenverfahren ebenfalls auf der Oberfläche durchgeführt wurde, erfolgte eine diskontinuierliche zerstörungsfreie Messung.

Die Untersuchungen erfolgten dabei an Estrichplatten mit unterschiedlichen Abmessungen, wobei Probekörper mit einer Kantenlänge von 200 und 400 mm hergestellt wurden. Um mögliche Einflüsse aus der Dicke der Proben sichtbar zu machen, erfolgte eine Variation der Probekörperdicke von 40 bis 80 mm. Zur Nachbildung eines Estrichs auf Trenn- bzw. Dämmschicht, wurde eine Versiegelung der Unterseite sowie der Seitenflächen der Probekörper vorgenommen (Abbildung 4.1). Zusätzlich zu den genannten wurden weitere Probekörper für vergleichende Untersuchungen mit den zerstörenden Feuchtemessmethoden (Darr- und CM-Methode) und zur Untersuchung des Erhärtungsverhaltens (versiegelte Probekörper) hergestellt.

Als Material wurde dazu ein im Wohnungsbau üblicher Fertigestrich CT C30 – F5 der Firma Sakret genutzt, welcher nach Herstellerangaben verarbeitet wurde und bei der Herstellung eine plastische Konsistenz erreichte. Das technische Merkblatt des Estrichs kann dem Anhang B.1 entnommen werden.

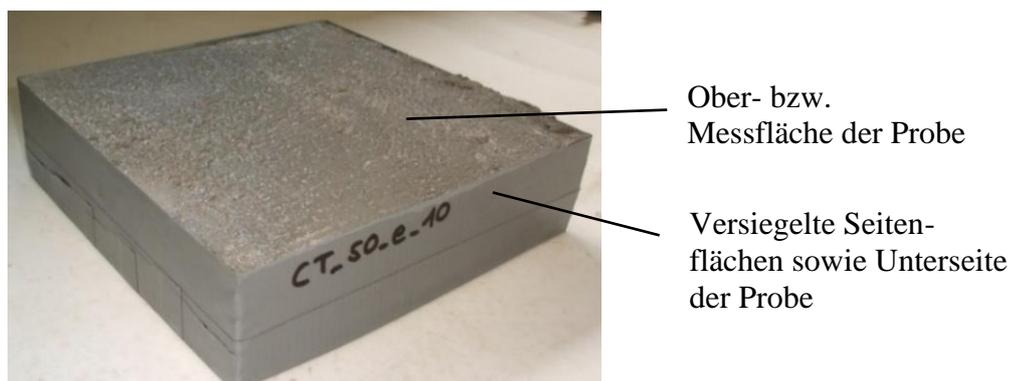


Abbildung 4.1: Probekörper zur Untersuchung der Erhärtung und Trocknung von Zementestrich.

Wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, erfolgte auch bei der Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung die Aufzeichnung der Messkurven mit Hilfe eines Rechners. Für die Untersuchungen wurden der für die Messung der Estrichfeuchte entwickelte offene Streufeld-Resonator R2 (siehe Abschnitt 2.1.2) und das Programm MOIST-Tools der Firma hf sensor GmbH genutzt. Der Sensor besitzt dabei eine

Eindringtiefe von ca. 40 bis 50 mm in den zu untersuchenden Estrich. Aufgrund der diskontinuierlichen Messung erfolgte keine programmtechnische Wahl eines Messintervalls. Die Einzelmessungen wurden am jeweiligen Messtag mit Bezug zur Probekörperbezeichnung und dem Messtag abgespeichert und der späteren Auswertung bereitgestellt.

Die Messung des Feuchtegehaltes erfolgte dabei an mehreren Messstellen auf der Oberfläche der Probekörper. Mit diesem Vorgehen war es möglich, die Streuung der Messwerte zu betrachten und mögliche Messfehler zu kompensieren. Abbildung 4.2 zeigt, am Beispiel der Probekörper mit einer Kantenlänge von 200 mm, ein solches Messraster, bei dem an fünf Stellen auf der Oberfläche des Probekörpers der Feuchtegehalt zerstörungsfrei ermittelt wurde.

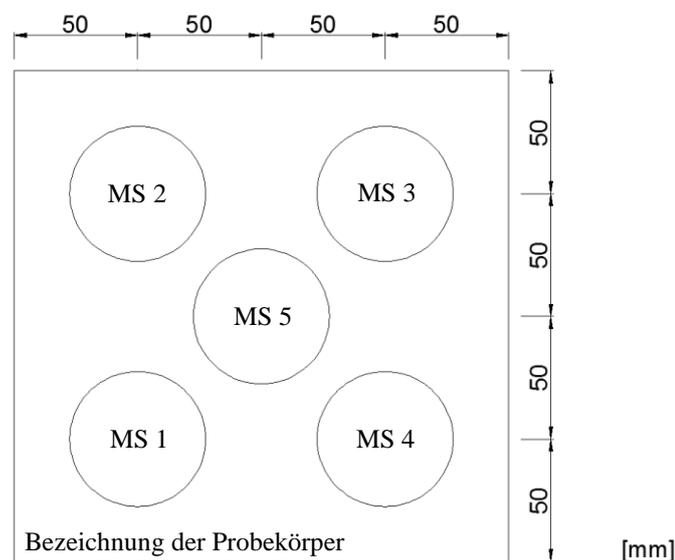


Abbildung 4.2: Verteilung der Messstellen (MS) auf der Oberfläche am Beispiel der Probekörper mit einer Kantenlänge von 200 mm.

4.1.2 Untersuchung der Erhärtung und Trocknung von Zementestrich

Die Untersuchungen des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe wurden als vergleichende Untersuchungen der zerstörungsfreien Mikrowellentechnik und der zerstörenden Methoden wie der Darr- und CM-Methode durchgeführt. Die Probekörper für die zerstörende Feuchtemessung und zur Untersuchung des Erhärtungsverhaltens wurden parallel hergestellt und bei den gleichen klimatischen Verhältnissen gelagert wie die Proben der zerstörungsfreien Feuchtemessung. Die Durchführung der einzelnen Versuchsreihen erfolgte bei unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen. Die Probekörperherstellung und der Ablauf der Untersuchungen werden im Folgenden vorgestellt.

Herstellung der Probekörper

Die Analyse der Prozesse aus Erhärtung und Trocknung erfolgte an Zementestrichplatten mit unterschiedlichen Kantenlängen und Dicken. Zur Variation der Kantenlänge und gleichzeitig der Probekörperdicke kamen einerseits Würfelschalungen mit einer Kantenlänge von 200 mm und andererseits eine selbstgefertigte Holzschalung mit einer Kantenlänge von 400 mm zum Einsatz. Zur Herstellung des Probematerials wurde ein Zwangsmischer verwendet. Die Schalungen wurden jeweils mit unterschiedlichen Füllhöhen (Probekörperdicken) gefüllt, wobei auf eine Verdichtung des Zementestrichs verzichtet wurde, es erfolgte einzig eine gleichmäßige Verteilung des Materials in den Schalungen und anschließend eine Glättung der Oberfläche.

Die Herstellung der Probekörper erfolgte dabei nach Angaben des technischen Merkblattes (siehe Anhang B.1) mit einer Anmachwassermenge von 9 M.-% von der Fertigmörtelmasse. Während der Herstellung des Probematerials wurden die Eigenschaften des frischen Estrichs, wie der Luftporengehalt und die Frischmörtelrohichte ermittelt. Die Eigenschaften des frischen Estrichs dienten dazu, mögliche Einflüsse auf das Mikrowellensignal und das Feuchteverhalten des Estrichs ableiten zu können.

Parallel zur Herstellung der Probekörper zur zerstörungsfreien Untersuchung wurden Proben mit gleicher Geometrie zur zerstörenden Messung der Feuchte mit der Darr- bzw. CM-Methode hergestellt.

Zur Untersuchung des Erhärtungsverhaltens kamen versiegelte Probekörper mit den Abmessungen $200 \cdot 200 \cdot 50 \text{ mm}^3$ für die Mikrowellentechnik sowie Prismen mit den Abmessungen $40 \cdot 40 \cdot 160 \text{ mm}^3$ zur Ermittlung der Druckfestigkeitsentwicklung zum Einsatz.

Die gemessenen Frischmörteleigenschaften sind im Anhang B.2, die ermittelten Druckfestigkeiten des Zementestrichs im Anhang B.3 dargestellt.

Ablauf der Untersuchungen

Um den Einfluss der klimatischen Verhältnisse während der Prozesse auf die Mikrowellenmessung und die zerstörenden Messverfahren (Darr- und CM-Methode) zu untersuchen, wurden drei verschiedene klimatische Bedingungen genutzt. In Tabelle 4.2 sind die Bezeichnungen der Versuchsreihen, die Probekörpergeometrie und die dazugehörigen klimatischen Verhältnisse während der Untersuchungen aufgelistet. Die Bezeichnung der Versuchsreihen entspricht dabei:

relative Luftfeuchte_Probekörperdicke

Die zerstörungsfreie Untersuchung erfolgte dabei angepasst an den Erhärtungs- und Trocknungsprozess der Proben. Es wurde zu Beginn in einem Intervall von 24 Stunden und im weiteren Verlauf der Untersuchung in einem Intervall von 7 bis 19 Tagen der Feuchtegehalt der Proben ermittelt (siehe Tabelle 4.3). Dieses Vorgehen sollte der unterschiedlichen Feuchteänderung während der Prozesse Rechnung tragen.

Die zerstörende Feuchtemessung mit der Darr-Methode erfolgte parallel zur Mikrowellenmessung, wobei an jedem Prüftag eine Probe für die integrale Feuchtemessung¹⁴ und ab dem 7. Prüftag zusätzliche Proben zur Bestimmung von Feuchtegradienten aus dem oberflächennahen, mittleren¹⁵ und unteren Teil des Estrichs entnommen wurden. Der Feuchtegehalt wurde nach [DIN12570] bei einer 105 °C Darrung der Proben bis zur Massenkonstanz mit der Gleichung 2.15 bestimmt. Die Massenkonstanz der Probe war dabei erreicht, wenn die Änderung der Massen an drei aufeinanderfolgenden Wägungen (Intervall 24 Stunden) unter 0,1 M.-% der feuchten Probe lag [DIN12570].

Die Messung des Feuchtegehaltes mit der CM-Methode wurde ab dem 7. Tag nach der Herstellung der Proben und in einem Intervall von ebenfalls 7 bis 19 Tagen vorgenommen. Die Probenentnahme erfolgte dabei integral über die Höhe des Estrichs, wobei zu Beginn der Untersuchung 20 g und bei einer zu erwartenden Feuchte von $\leq 3,0$ CM-% 50 g Probenmaterial zur Feuchtebestimmung genutzt wurden. Das Probenmaterial wurde vor der Messung mit einem Fäustel auf eine Korngröße von ca. 5 mm zerkleinert. Danach wurde das Probenmaterial mit den vier Stahlkugeln und der Calciumcarbid-Ampulle in das CM-Gerät gefüllt. Im Weiteren erfolgte die eigentliche Prüfung (Das Vorgehen entspricht dabei dem Inhalt der DIN 18560-1):

- kräftiges Schütteln (2 Minuten)
- warten (3 Minuten)
- kräftiges Schütteln (1 Minuten)
- warten (4 Minuten)
- kräftiges Schütteln (10 Sekunden)
- Wert ablesen

Neben dem Feuchtegehalt wurde das Erhärtungsverhalten ebenfalls in einem angepassten Intervall anhand der Druckfestigkeitsentwicklung von zusätzlich hergestellten Prismen (nach DIN EN 13892-2) ermittelt. Hierfür erfolgte eine versiegelte Lagerung der Prismen

¹⁴ Feuchtemessung gleichmäßig verteilt über die gesamte Höhe des Estrichs.

¹⁵ Bei den Probekörpern mit Dicken von 40 und 50 mm wurden nur im oberen und unteren Bereich Proben zur Untersuchung von Feuchtegradienten entnommen.

bis zum jeweiligen Prüftag, sodass die Probekörper keine Feuchte verloren und somit, wie die Probekörper der Mikrowellentechnik, ebenfalls unter versiegelten Bedingungen erhärteten. Die Temperatur im Umfeld der Lagerung betrug $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabelle 4.2: Bezeichnung der Versuchsreihen abhängig von den klimatischen Verhältnissen während der Untersuchung und der Probekörperdicke.

Bezeichnung (relative Luftfeuchte_Probekörperdicke)	Probekörpergeometrie	Temperatur	relative Luftfeuchte
35_40	400 · 400 · 40 mm ³	20 ± 2 °C	35 ± 5 %
35_60	400 · 400 · 60 mm ³		
35_80	400 · 400 · 80 mm ³		
50_50	200 · 200 · 50 mm ³		50 ± 5 %
50_70	200 · 200 · 70 mm ³		
65_40	400 · 400 · 40 mm ³		65 ± 5 %
65_60	400 · 400 · 60 mm ³		
65_80	400 · 400 · 80 mm ³		

Tabelle 4.3: Beispielhafte Aufteilung der Mess- bzw. Prüftage für eine Versuchsreihe mit der Anzahl der Messungen / Proben für die zerstörungsfreie- bzw. zerstörende Feuchtemesstechnik und zur Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung.

Tag	Mikrowellenmessung	Darr-Methode		CM-Methode	Druckfestigkeit
		integral	Gradient		
Anzahl der Einzelmessungen		Anzahl der Probekörper			
1	ca. 40 pro Messtag	1	/	/	/
2		1	/	/	2
3		1	/	/	2
7		1	1	1	2
10		1	1	1	/
14		1	1	1	2
21		1	1	1	2
28		1	1	1	2
47		1	1	1	/
63		1	1	1	/
Σ 400		Σ 10	Σ 7	Σ 7	Σ 12

4.2 Auswertung der Untersuchungen

Die Auswertung der Untersuchungen zum Erhärtungs- und Trocknungsprozess zementgebundener Baustoffe soll Zusammenhänge der Messdaten der Mikrowellentechnik und der Feuchtegehalte, welche mit Hilfe der Darr- bzw. CM-Methode ermittelt wurden, aufzeigen. Gleichzeitig werden Einflüsse aus der Wasserbindung während des Erhärtungsprozesses betrachtet. Zur Auswertung der Untersuchung dient dabei ein einparametrisches Verfahren, wobei die Werte des Minimums der Messkurve $MinFI$ genutzt werden. Die Nutzung des Parameters $MinFI$ erfolgt dabei in Anlehnung an die Untersuchungen des Erhärtungsprozesses (Kapitel 3), wobei aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus, der diskontinuierlichen Messung und des unbekanntenen Feuchtezustandes bei der ersten Messung keine Nutzung der Änderung des Feuchteindex im Scheitelpunkt der Resonanzkurve $\Delta MinFI$ möglich ist. Des Weiteren konnte, aufgrund der gleichmäßigen Temperatur von $20 \pm 2 \text{ °C}$ im Umfeld der Untersuchungen, auf eine Kompensation von Einflüssen aus der Sensor- und / oder Materialtemperatur verzichtet werden.

Die Auswertung der Untersuchungen gliedert sich hierbei in die Betrachtung des Verlaufs des Parameters während des Erhärtungs- und Trocknungsprozesses (Abschnitt 4.2.1) sowie der Auswirkungen von unterschiedlichen Dicken der Probekörper und verschiedenen klimatischen Verhältnissen in der umgebenden Luftschicht (Abschnitt 4.2.2). Im Weiteren folgt die Betrachtung eines möglichen Zusammenhangs des Feuchtegehaltes mit den gemessenen Feuchteindizes (Abschnitt 4.2.3) und eine Untersuchung von Einflüssen der Wasserbindungsprozesse (Abschnitt 4.2.4), wobei Aspekte wie die Trocknungstemperatur der Darr-Methode und eine Wasseraufnahme des erhärteten Zementestrichs diskutiert werden. Darauf aufbauend erfolgt die Aufstellung eines Berechnungsmodells für die Ermittlung des Feuchtegehaltes für die Belegreife von Zementestrich (Abschnitt 4.3). Die berechneten Feuchtegehalte des Modells werden im Weiteren mit den Werten der Darr- bzw. CM-Methode verglichen. Das Vorgehen zur Auswertung der Untersuchungen verdeutlicht Abbildung 4.3.

Der Feuchtegehalt wurde dabei mit Hilfe der Mikrowellentechnik an mehreren Probekörpern und an insgesamt fünf Messstellen je Probekörper gemessen. Aus den Einzelmessungen aller Proben erfolgte eine Mittelwertbildung für den jeweiligen Messtag, hierbei konnten objektive Messfehler betrachtet sowie diskutiert und etwaige subjektive Messfehler während der Messungen ausgeschlossen werden.

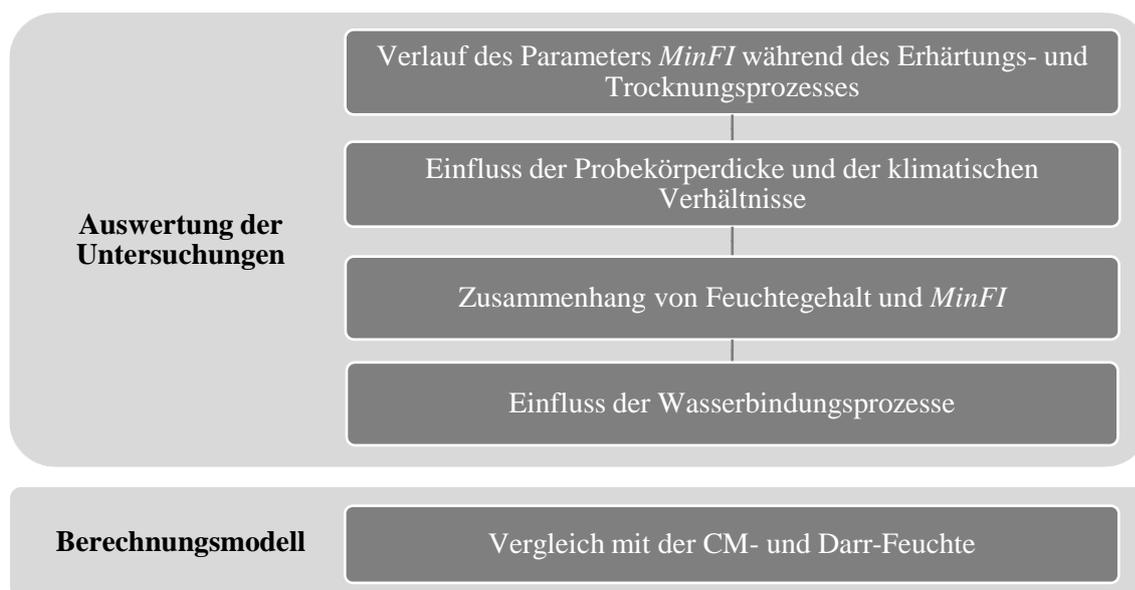
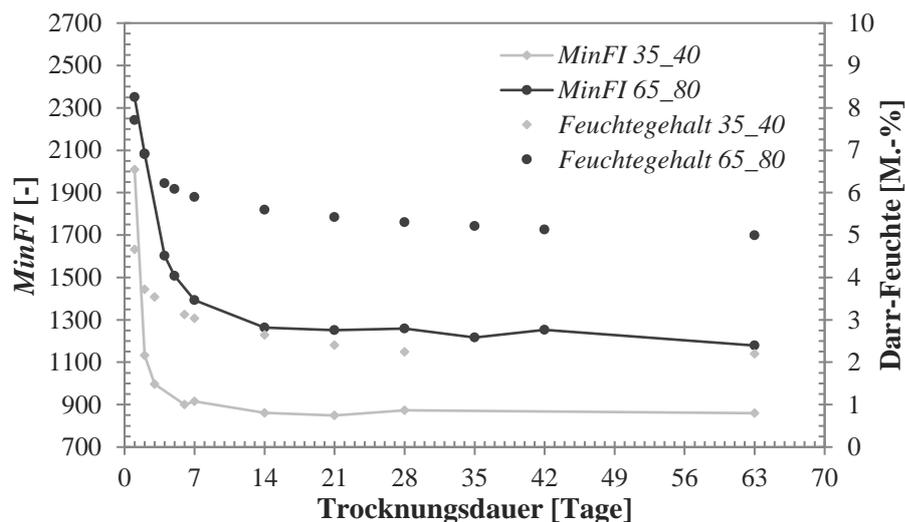


Abbildung 4.3: Vorgehen zur Auswertung der Untersuchungen des Erhärungs- und Trocknungsprozesses zementgebundener Baustoffe.

4.2.1 Verlauf des Parameters *MinFI*

Der Verlauf der gemessenen Feuchteindizes im Minimum der Messkurve *MinFI* wurde hinsichtlich des Zusammenhangs mit den ermittelten Feuchtegehalten untersucht. In Abbildung 4.4 ist beispielhaft der zeitliche Verlauf der Feuchteindizes und die entsprechenden Feuchten für die Versuchsreihen 35_40 und 65_80 dargestellt. Die 40 mm dicken Proben wurden dabei bei einer relativen Luftfeuchte von $35 \pm 5 \%$, die 80 mm dicken Proben bei einer relativen Luftfeuchte von $65 \pm 5 \%$ getrocknet.

Abbildung 4.4 verdeutlicht, dass der Trocknungsprozess anhand der Änderung des Parameters *MinFI* gut nachvollzogen werden kann. So zeigt der Verlauf der Mikrowellenmesswerte über die Trocknungsdauer ein analoges Verhalten wie die Werte der integralen Darr-Feuchte. Es wird die schnelle Trocknung der Versuchsreihe 35_40 sowohl in den Feuchteindizes als auch in den Darr-Feuchten sichtbar. Auch die höheren Feuchten der Versuchsreihe 65_80, welche nach einer Trocknungsdauer von 63 Tagen noch ca. 5,0 M.-% Feuchte besitzt, äußern sich in erhöhten Feuchteindizes der Mikrowellenmessung.



Abbildungung 4.4: Beispielhafter Verlauf der Feuchteindizes im Minimum und der Darr-Feuchte in Abhängigkeit von der Trocknungsdauer für die Versuchsreihen 35_40 und 65_80.

4.2.2 Einfluss der Probekörperdicke und der klimatischen Verhältnisse während des Trocknungsprozesses

Der Einfluss der Probekörperdicke auf die Messwerte der Mikrowellentechnik wurde an den Versuchsreihen mit gleichen klimatischen Verhältnissen, aber unterschiedlichen Dicken der Probekörper, untersucht. Werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen verglichen, können Aussagen zur Messwertänderung abhängig von der Dicke des Estrichs getroffen werden. Dabei wird im Folgenden ein Vergleich der Verläufe des Parameters *MinFI* während des Trocknungsprozesses und der dazu-gehörigen ermittelten Feuchtegehalte vorgenommen.

Abbildungung 4.5 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihen, welche unter einem Versuchsklima von 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % relativer Luftfeuchte durchgeführt wurden. Es zeigt sich, dass die integralen Feuchtegehalte auch nach einer Lagerung der Probekörper von 63 Tagen noch zwischen 3,3 und 5,0 M.-% betragen. Dies kann auf die hohe relative Luftfeuchte von 65 ± 5 % im Umfeld der Trocknung und die nur auf die Oberfläche beschränkte Wasserabgabe zurückgeführt werden, wobei eine Abstufung der Feuchtegehalte im Laufe des Trocknungsprozesses abhängig von der Probekörperdicke erkennbar ist. Die Feuchteindizes der Mikrowellentechnik zeigen ebenfalls ein abgestuftes Verhalten, indes die Eindringtiefe des Sensors von maximal 50 mm deutlich wird, und eine Abstufung zwischen Probekörperdicken von 60 und 80 mm im Parameter *MinFI* nicht erkennbar ist. Dies kann damit erklärt werden, dass der obere Bereich der Estrichplatte getrocknet ist und nur noch in den unteren Bereichen ein erhöhter Anteil Feuchte existiert, welcher vom Sensor nicht erreicht wird. Dieses Verhalten zeigt sich in den fast identischen Verläufen der Feuchteindizes der Versuchsreihen 65_60 und 65_80.

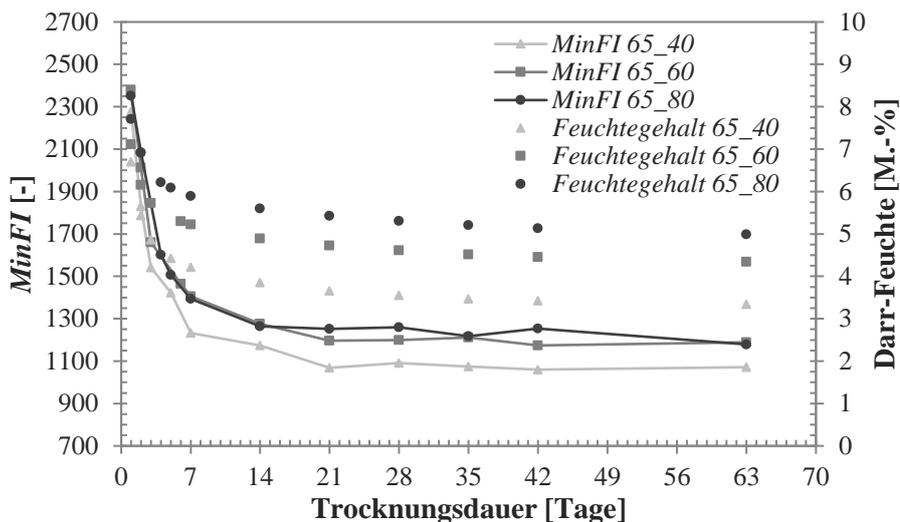


Abbildung 4.5: Vergleich der Messwerte für klimatische Bedingungen von $20 \pm 2 \text{ °C}$ / $65 \pm 5 \text{ % RH}$ und Probekörperdicken von 40, 60 und 80 mm.

In Abbildung 4.6 sind die Ergebnisse der Versuchsreihen mit einem Versuchsklima von $20 \pm 2 \text{ °C}$ und $35 \pm 5 \text{ %}$ relativer Luftfeuchte dargestellt. Das Diagramm macht deutlich, dass die Trocknung für die Versuchsreihe 35_40 schnell erfolgte. Die ermittelten integralen Feuchtegehalte sind bereits nach ca. 3 Tagen unterhalb von 3,5 M.-%. Die Feuchten der Versuchsreihen 35_60 und 35_80 sind dagegen noch hoch und betragen nach 63 Tagen Trocknung ca. 4,0 M.-%.

Diese hohe Feuchte der Versuchsreihen 35_60 und 35_80 kann damit erklärt werden, dass der obere Bereich des Estrichs schnell getrocknet ist, hingegen der untere Bereich noch viel Feuchte besitzt. Dabei kann es zu einem sogenannten „Kapillaren Abriss“ der Feuchte innerhalb des Porensystems gekommen sein. Der kapillare Wassertransport des Estrichs an die Oberfläche wurde gestört und die Restfeuchte im unteren Bereich des Estrichs kann nur noch über dampfförmigen Feuchtetransport an die Oberfläche gelangen. Der Trocknungsprozess des Estrichs verlängert sich damit deutlich, welches sich auch in den gemessenen Feuchteindizes der Mikrowellentechnik zeigt. Obwohl der integrale Feuchtegehalt noch hoch ist, zeigen die Feuchteindizes schnell konstante niedrige Werte. Dieses Verhalten ist erneut auf die Eindringtiefe des Sensors R2 von maximal 50 mm und einem Feuchteausgleich mit der umgebenden Luftschicht und somit einen trockenen Zustand der Probe im oberen Bereich des Estrichs zurückzuführen.

Ein Vergleich der Abbildung 4.5 und 4.6 macht deutlich, dass das Trocknungsverhalten bei unterschiedlichen klimatischen Umgebungsbedingungen mit Hilfe der Mikrowellenmesstechnik dargestellt werden kann. Gerade die schnelle Trocknung der Probekörper bei einem Klima von $20 \pm 2 \text{ °C}$ und $35 \pm 5 \text{ %}$ relativer Luftfeuchte zeigt sich auch in den gemessenen Feuchteindizes. Die Feuchteindizes nach einer Trocknungsdauer von

63 Tagen besitzen eine analoge Abstufung wie die gemessenen Feuchten, lediglich die Eindringtiefe des Sensors von maximal 50 mm besteht und wird bei den Probekörpern mit Dicken von 60 und 80 mm sichtbar. Der Sensor erfasst dabei nicht die gesamte Dicke der Probe, sondern nur den oberen Bereich. Zur Eliminierung des Einflusses der Eindringtiefe wäre eine elektrotechnische Anpassung des Sensoraufbaus notwendig, sodass der Sensor die jeweilige Dicke des Estrichs messtechnisch erfassen kann.

Aufgrund des Einflusses der Eindringtiefe des Sensors R2 auf die Untersuchung des Feuchtegehaltes von Estrichen wurde zur Untersuchung des Zusammenhangs der Feuchtegehalte und des Parameters *MinFI* die Darr-Feuchte im oberen Bereich der Proben (integraler Wert der oberen 50 mm¹⁶) als Referenzwert genutzt.

Die vorstehend noch nicht gezeigten Messwerte und eine Auflistung aller ermittelten Feuchteindizes und Feuchtegehalte der Untersuchungen zum kombinierten Prozess aus Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe sind im Anhang D dargestellt.

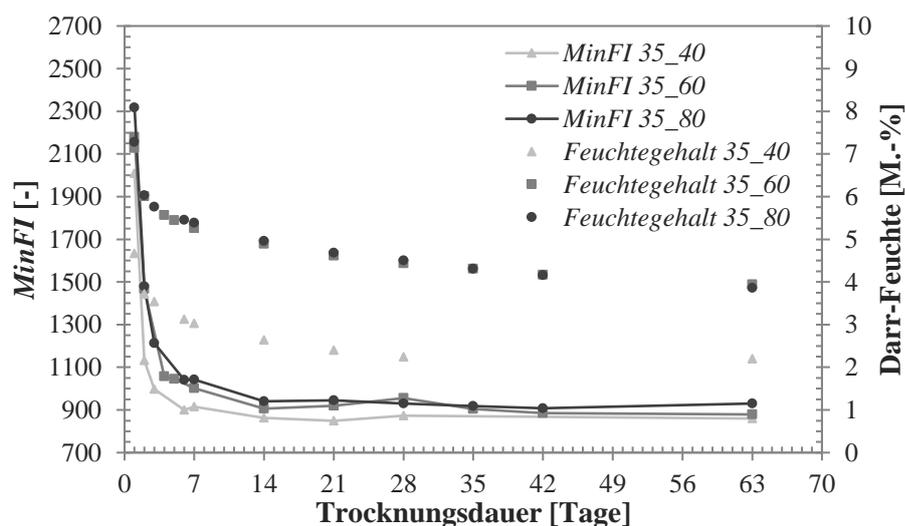


Abbildung 4.6: Vergleich der Messwerte für klimatische Bedingungen von $20 \pm 2 \text{ °C}$ / $35 \pm 5 \text{ \% RH}$ und Probekörperdicken von 40, 60 und 80 mm.

4.2.3 Zusammenhang von Feuchtegehalt und Feuchteindex

In den Untersuchungen wurde für die Mikrowellenmesstechnik der Feuchteindex im Minimum der Messkurve *MinFI* und als Referenzwert die Darr-Feuchte der oberen 50 mm des Estrichs ermittelt. Werden die Darr-Feuchten der Versuchsreihen mit unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen in Abhängigkeit zu den Messwerten des Parameters *MinFI* dargestellt, so ergibt sich Abbildung 4.7.

¹⁶ Diese Werte wurden aus den Messwerten der Darr-Feuchte zur Ermittlung von Feuchtegradienten bestimmt, welche in verschiedenen Tiefen des Estrichs entnommen wurden (siehe Abschnitt 4.1.2). Bei Probekörperhöhen von 40 und 50 mm wurde die gesamte Dicke des Estrichs genutzt.

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass es oberhalb einer Feuchte von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% mit abnehmendem Feuchtegehalt zu einer Verringerung des Parameters $MinFI$ kommt. Der Zementestrich befindet sich im Übergang vom überhygroskopischen zum hygroskopischen Feuchtebereich, und es existiert eine erhöhte Feuchte im Baustoff. Dabei entweicht während des Trocknungsprozesses freies Kapillarwasser (siehe Abschnitt 2.3.1), welches die Mikrowellentechnik messtechnisch gut erfassen kann.

Bei Feuchtegehalten unterhalb von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% befindet sich der zementgebundene Baustoff im Sorptionsfeuchtebereich (siehe Abschnitt 2.3.1). Dieser Feuchtebereich ist gekennzeichnet durch molekulare und dampfförmige Feuchtetransportprozesse, wobei ein Großteil der Wassermoleküle während des Trocknungsprozesses unter einer starken Bindung an den Oberflächen des Porensystems gebunden sind [Kru1], [Wit1]. Dieses stark gebundene Wasser erreicht die Mikrowellentechnik messtechnisch nicht, und es kommt trotz abnehmendem Feuchtegehalt zu einer Stagnierung der Feuchteindizes. Gleichzeitig werden bei einem Vergleich der einzelnen Versuchsreihen aber auch Abweichungen in den Messwerten sichtbar. Die Wasserbindung des Estrichs erfolgte für die verschiedenen klimatischen Bedingungen unterschiedlich, welches zu unterschiedlichen Verläufen der Feuchtegehalte in Abhängigkeit zu den Feuchteindizes führt und die Darstellung der Verringerung des Parameters $MinFI$ erschwert. Die Verringerung des Parameters wird jedoch in den Werten der einzelnen Versuchsreihen sichtbar.

Dieses feuchteabhängige Verhalten des Parameters $MinFI$ verdeutlicht, dass die Wasserbindung eines Zementestrichs Einfluss auf die zerstörungsfreie Untersuchung des Feuchtegehaltes zementgebundener Baustoffe besitzt. Dieser Aspekt soll im Folgenden näher betrachtet werden.

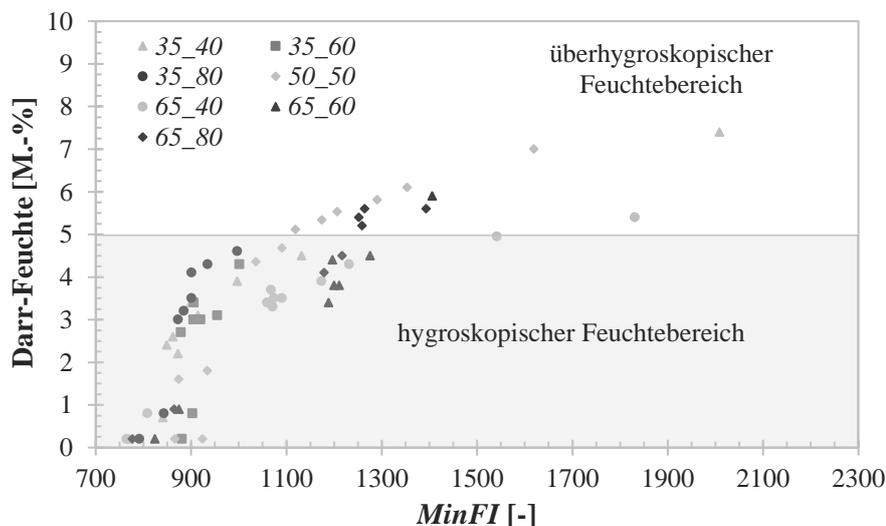


Abbildung 4.7: Feuchtegehalte in Abhängigkeit zum Parameter $MinFI$ während des Trocknungsprozesses von Zementestrich.

4.2.4 Einfluss der Wasserbindungsprozesse

Im Laufe des Hydratationsprozesses wird freies Wasser durch die Reaktion chemisch und physikalisch gebunden (siehe Abschnitt 2.2.1). Ein großer Teil dieser Wasserbindungsprozesse erfolgt dabei in den ersten 7 Tagen nach der Herstellung des Baustoffs. Bei der Ermittlung des Feuchtezustandes mit Hilfe der Darr-Trocknung des zementgebundenen Materials wird dabei das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser ausgetrieben, das chemisch gebundene Wasser verbleibt nach der Darrung bei 105 °C im Baustoff (siehe Abschnitt 2.3.1).

Wird somit in den ersten 7 Tagen nach der Herstellung des Estrichs die Trockenmasse mit Hilfe der Darr-Methode ermittelt, so ist diese Trockenmasse, aufgrund der noch nicht vollständigen chemischen Wasserbindung, geringer als zum Beispiel nach 28 Tagen (Abbildung 4.8). Gleichzeitig wird die chemische und physikalische Wasserbindung von der Zusammensetzung des Zementestrichs und auch vom Trocknungsprozess beeinflusst. Werden zum Beispiel Zusatzstoffe wie Steinkohlenflugasche oder Silikastaub dem Estrich zugegeben, ändern sich die Anteile des Wassers, welche chemisch und physikalisch gebunden werden. Parallel kann es bei einer schnellen Trocknung dazu kommen, dass unhydratisierte Zementanteile im Baustoff verbleiben. Die chemische Reaktion der unhydratisierten Anteile kann zu einem späteren Zeitpunkt bei ausreichend Wasserangebot „teilweise“ fortgesetzt werden [Eng1], [Wit1], hierbei bindet der zementgebundene Baustoff weiter freies möglicherweise schädliches Wasser.

Bei einer zerstörungsfreien Untersuchung des Feuchtegehaltes mit Hilfe der Mikrowellentechnik werden nur das freie und Teile des physikalisch gebundenen Wassers erfasst (siehe Abschnitt 2.3.3). In den Untersuchungen des Erhärtungsverhaltens zementgebundener Baustoffe wurde deutlich, dass der Hydratationsprozess mit einer Verringerung des Feuchteindex im Minimum *MinFI* ohne eine Änderung des Feuchtegehaltes der Proben einhergeht (Abbildung 4.8). In den Mikrowellenmessdaten des kombinierten Prozesses ist somit neben der Messwertänderung durch den Trocknungsprozess auch immer ein Anteil Messwertänderung enthalten, welcher aus der Erhärtung des zementgebundenen Baustoffs resultiert.

Die Messwerte des Parameters *MinFI* ändern sich dabei während einer hygriech versiegelten Untersuchung des Erhärtungsprozesses von ca. 2350 auf 2170, wobei in den Messwerten des Parameters neben den Wasserbindungsprozessen auch die Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Materials enthalten ist. Zusätzlich zur Verringerung des Parameters *MinFI* durch den Erhärtungsprozess werden geringere Werte des Parameters infolge der Trocknung des Estrichs gemessen.

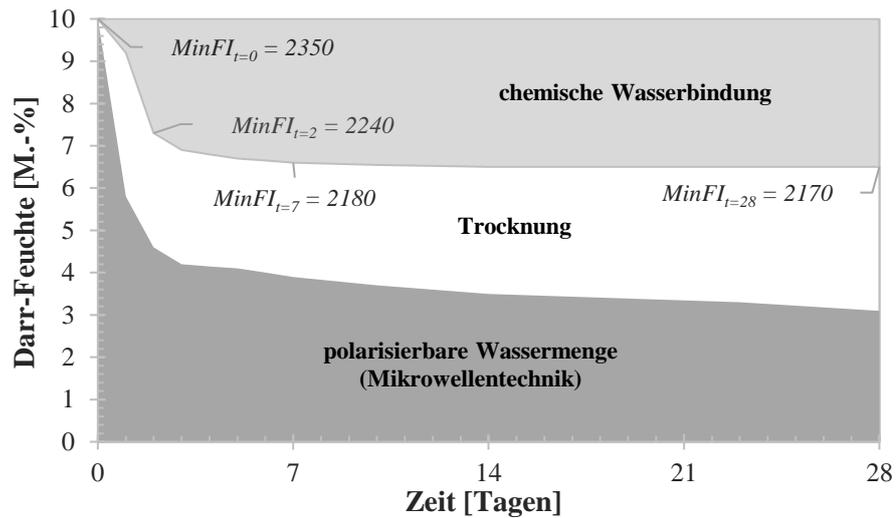


Abbildung 4.8: Anteile an freiem und gebundenem Wasser im Laufe des Erhärtungs- und Trocknungsprozesses sowie Messwerte des Parameters $MinFI$ während des Erhärtungsprozesses.

Wird die Änderung des Parameters $MinFI$ infolge des Erhärtungsprozesses bei den Messergebnissen des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung berücksichtigt, so wird der Zusammenhang des Feuchtegehaltes und des Parameters $MinFI$ ausschließlich für den Trocknungsprozess sichtbar.

Abbildung 4.9 zeigt den Verlauf der Messwerte des kombinierten Prozesses und des Trocknungsverlaufes, wobei es im Laufe des Hydratationsprozesses zu einer Verschiebung der Messwerte des Parameters $MinFI$ zu höheren Werten kommt. Der Feuchteindex bei maximaler Feuchte, zu Beginn des Hydratationsprozesses, ist dabei unabhängig von der Änderung des Parameters während des Erhärtungsprozesses.

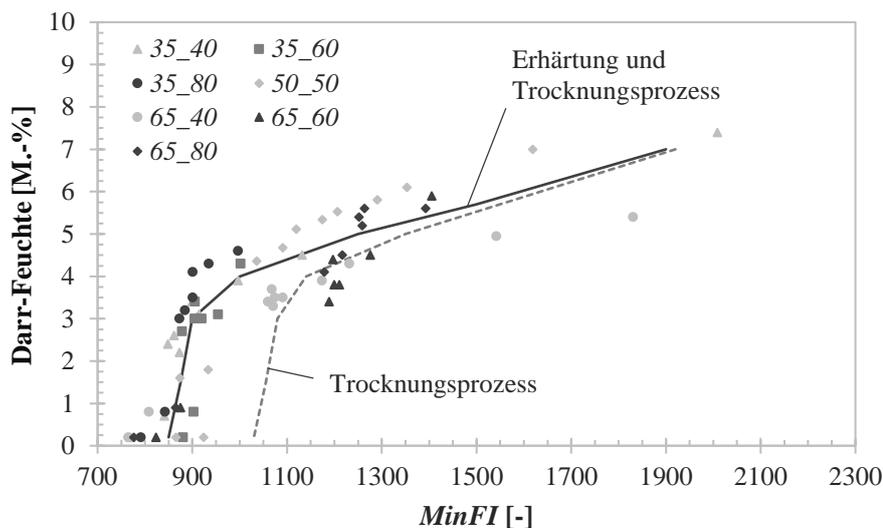


Abbildung 4.9: Änderung der Messwerte des Parameters $MinFI$ abhängig von der Erhärtung und Trocknung des Zementstrichs.

Die vorstehend vorgestellten Ergebnisse der Untersuchungen verdeutlichen, dass die Wasserbindungsprozesse in zementgebundenen Baustoffen einen großen Einfluss auf die Bestimmung der Feuchtegehalte mit Hilfe der Mikrowellentechnik besitzen. Es kommt zu einer Stagnation der Feuchteindizes unterhalb einer Feuchte von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% und zu einer Verringerung des Parameters *MinFI* infolge des Erhärtingsprozesses. Die Wasserbindungsprozesse laufen dabei für unterschiedliche klimatische Verhältnisse und abhängig von der Zusammensetzung des Zementstrichs verschieden ab, was zu Abweichungen in den Messwerten der Mikrowellentechnik aber auch der Darr-Feuchte führt.

Betrachtet man jedoch die verschiedenen Anteile des Wassers im zementgebundenen Baustoff, so wird deutlich, dass nur das freie und physikalisch schwach gebundene Wasser eine schädigende Wirkung im Sinne der Belegreife besitzt (siehe Abschnitt 2.3.3). Bei einer Darr-Trocknung bei 105 °C wird jedoch das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser ausgetrieben und somit auch Wasseranteile in die Bewertung des Feuchtegehaltes mit einbezogen, welche für die Belegreife unkritisch sind. So kommen die in zum Beispiel [Kru2] genannten Feuchtegehalte für die Belegreife von Zementestrichen von 4,5 bis 5,5 M.-% zustande. Herstellerabhängig werden Zusatzstoffe und -mittel dem Zementstrich beigefügt, wobei der Zementstrich unterschiedliche Mengen an Anmach-wasser chemisch und physikalisch bindet, was dazu führt, dass der unkritische Wasseranteil und somit auch die Feuchtegehalte für die Belegreife stark variieren.

Vor diesem Hintergrund soll der Einfluss der Darr-Trocknungstemperatur auf die Feuchtegehalte und die Mikrowellenmesswerte untersucht werden. Dies erfolgt mit dem Ziel, nur kritische Wasseranteile im Estrich zu betrachten. Dabei soll die Darr-Trocknungstemperatur angepasst werden und die Mikrowellenmesswerte zur Beurteilung der kritischen oder unkritischen Wasseranteile dienen. Zuvor wird das Verhalten eines erhärteten Zementstrichs bei Wasseraufnahme untersucht, wobei Unterschiede in den Prozessen aus Desorption und Sorption betrachtet werden sollen.

Untersuchung des Verhaltens bei Wasseraufnahme bzw. Wasserabgabe (ohne Hydrationsprozess)

Die Untersuchung des Verhaltens bei Wasseraufnahme zementgebundener Baustoffe erfolgte an den gleichen Proben, mit denen auch der Erhärtings- und Trocknungsprozess untersucht wurde. Die Probekörper wurden nach der Untersuchung des Trocknungsprozesses für ca. 10 Monate in einem Klimaraum (20 ± 2 °C und 65 ± 5 % relative Luftfeuchte) gelagert. Nach diesem Zeitraum erfolgte die Ermittlung des Trockengewichts der Proben mit Hilfe der Darrung bei 105 °C. Im Weiteren wurden die Proben in einem

Klimaschrank mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und einer Temperatur von 20 °C gelagert. Zusätzlich zur Feuchtaufnahme im Klimaschrank erfolgte im überhygroskopischen Feuchtebereich eine Befeuchtung der Oberflächen der Proben, wobei auf eine gleichmäßige Verteilung der Feuchte im Baustoff geachtet wurde. Die Sättigungfeuchte wurde in einem Wasserbad eingestellt. Zum jeweiligen Messzeitpunkt wurde neben dem Feuchteindex im Minimum *MinFI* auch der Feuchtegehalt der Probe ermittelt.

Abbildung 4.10 zeigt die ermittelten Darr-Feuchten in Abhängigkeit zum Parameter *MinFI*. Im Vergleich zu den Werten des Trocknungsverhaltens existiert dabei kein Feuchtebereich mit stagnierenden Feuchteindizes. Es ist ein linearer Zusammenhang der Darr-Feuchten mit den Feuchteindizes im Minimum zu erkennen.

Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass die im erhärteten Zustand aufgenommenen Wassermoleküle im Sorptionsfeuchtebereich an den Porenoberflächen nicht stark gebunden sind und von der Mikrowellentechnik messtechnisch erfasst werden können. Im überhygroskopischen Feuchtebereich sorgen die freien Wassermoleküle für einen stetigen Anstieg des Parameters *MinFI* mit zunehmender Darr-Feuchte.

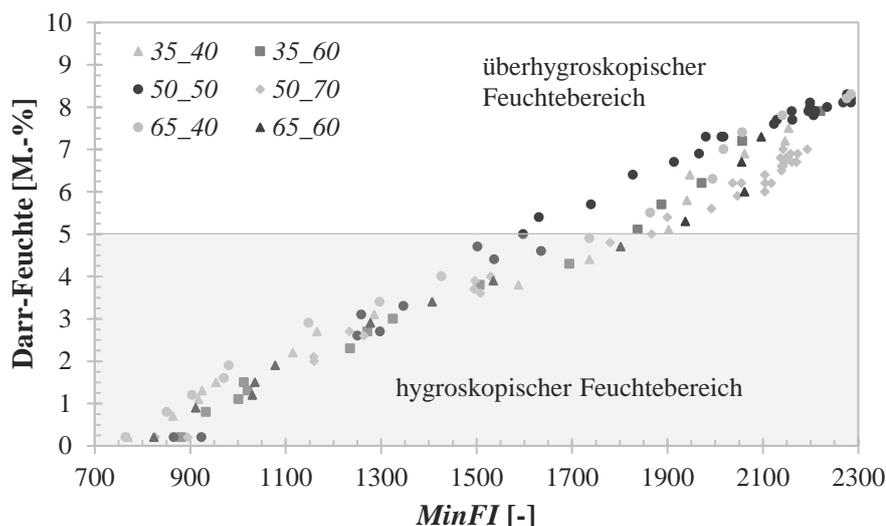


Abbildung 4.10: Zusammenhang von Feuchtegehalt und Feuchteindex *MinFI* während der Wasseraufnahme von Zementestrich.

Die Untersuchung der Wasseraufnahme zeigt, dass ein nahezu linearer Zusammenhang des Parameters *MinFI* zum Feuchtegehalt existiert. Dabei tritt im Vergleich zum kombinierten Erhärtungs- und Trocknungsprozess unterhalb einer Feuchte von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% keine Stagnation der Feuchteindizes auf. Es existiert somit ein Unterschied in den Mikrowellenmesswerten der Desorption (Evaporation) bzw. Sorption (Wasseraufnahme) von Zementestrich (Abbildung 4.11).

Diese Hysterese der Wasserbindungsprozesse in den Desorptions- bzw. Sorptionsprozessen von Zementestrichen wurde bereits in Abschnitt 2.3.1 erläutert. Im Unterschied zur Hysterese der Feuchtespeicherfunktion, welche bei einer Gleichgewichtsfeuchte untersucht wird und Rückschlüsse auf den Feuchtegehalt des Materials gezogen werden, drückt die Hysterese in den Feuchteindizes jedoch direkt die Unterschiede in den Wasserbindungsprozessen des Zementestrichs aus.

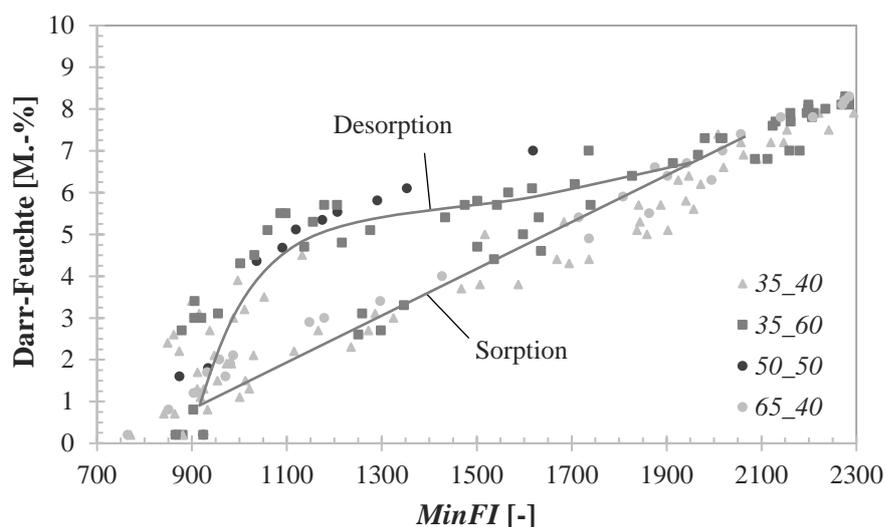


Abbildung 4.11: Hysterese in den Messwerten abhängig vom Desorptions- oder Sorptionsprozess.

Untersuchung der Darr-Trocknungstemperatur beim Prozess aus Erhärtung und Trocknung (Feuchte- T_{40}) (inkl. Hydratationsprozess)

Für die Trocknung eines Zementestrichs ist die auf der Baustelle maximal auftretende Raumtemperatur während des Trocknungsprozesses von Interesse. Bei dieser Temperatur und einer geringen relativen Luftfeuchte wäre die praktisch minimale Feuchte des Estrichs (ohne Fußbodenheizung) erreicht. Die in der Praxis maximale Raumtemperatur kann dabei mit ca. 40 °C abgeschätzt werden. Wird also eine Estrichprobe bei 40 °C im Trockenschrank gedarrt, so stellt sich die oben genannte praktisch minimale Feuchte ein. Die Trocknungstemperatur von 40 °C soll im Folgenden bei der Ermittlung der Darr-Feuchten angewendet und erneut ein Zusammenhang des Feuchtegehaltes mit dem Parameter *MinFI* aufgezeigt werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Darr-Trocknungstemperatur auf die Werte der Mikrowellenmessung und die Feuchtegehalte des Zementestrichs wurden Probekörper mit den Abmessungen von 200 · 200 · 50 mm³ hergestellt. An diesen Probekörpern erfolgten während des Trocknungsprozesses die Ermittlung der Feuchteindizes *MinFI*, die Messung der CM-Feuchte und die Ermittlung der Darr-Feuchte bei Trocknungstemperaturen von 40 und 105 °C. Das Material, die Herstellung der Probekörper, der

Versuchsaufbau und das Vorgehen während der Messungen, waren identisch mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die oben beschriebene Stagnation der Feuchteindizes bei Feuchtegehalten unterhalb von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% für eine Trocknungstemperatur von 40 °C nicht existiert. Es konnte ein direkter Zusammenhang der Feuchteindizes und der Feuchtegehalte (Feuchte-T₄₀) über beide Wassergehaltsbereiche festgestellt werden (Abbildung 4.12).

Dies bestätigt die vorstehend getroffene Aussage, dass bei einer Darrung des Estrichs bei 105 °C im hygroskopischen Feuchtebereich nur noch stark gebundene Anteile im Estrich vorhanden sind, welche von der Mikrowellentechnik messtechnisch nicht erfasst werden.

Der Unterschied zwischen den Werten der Feuchtegehalte bei einer 40 °C bzw. 105 °C Darrung liegt dabei bei ca. 1,5 M.-%. Bei einer Trocknung bei 105 °C wird somit ca. 1,5 M.-% mehr Feuchte aus dem Porensystem des Estrichs entfernt, im Vergleich mit einer 40 °C Trocknung. Der Unterschied der Feuchtegehalte drückt dabei den Anteil an stark gebundenem Wasser im Zementestrich aus. Dies bestätigt und überträgt die Ergebnisse der Untersuchungen von [Bob1] (siehe Abschnitt 2.3.3) zu den Einflüssen des physikalisch stark gebundenen Wassers auf Zementestriche.

Werden die Feuchtegehalte bei der Darr-Trocknungstemperatur von 40 °C mit den ermittelten CM-Feuchten verglichen, so ist zu erkennen, dass die CM-Feuchten im Mittel ca. 0,3 CM-% geringer sind im Vergleich zur ermittelten Feuchte-T₄₀. Diese Differenz in den Feuchtwerten muss bei der Ermittlung der Feuchtegehalte für die Belegreife berücksichtigt werden.

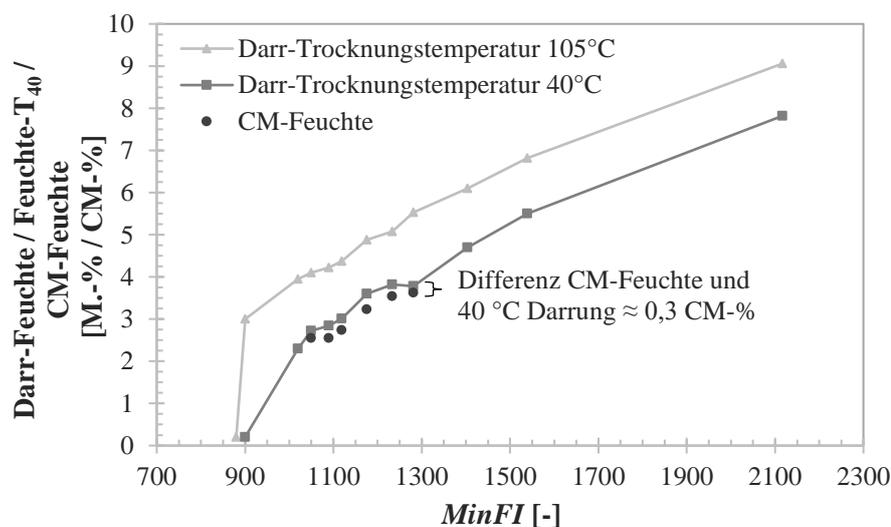


Abbildung 4.12: Vergleich der Feuchtegehalte in Abhängigkeit vom Feuchteindex für Trocknungstemperaturen von 40 °C und 105 °C.

Vergleich der Werte der Erhärtung und Trocknung bei einer Darr-Trocknungstemperatur von 40 °C (Feuchte-T₄₀) mit der Wasseraufnahme

Werden die Ergebnisse der Untersuchungen bei einer Darr-Trocknungstemperatur von 40 °C mit der Wasseraufnahme (Rücktrocknungstemperatur 105 °C) verglichen (Abbildung 4.13), so wird deutlich, dass die Änderung der Feuchteindizes der Mikrowellentechnik in Abhängigkeit zu den Feuchtegehalten, für die Prozesse aus Desorption- bzw. Sorption, ein kongruentes Verhalten zeigt. Wird zusätzlich die Änderung des Parameters *MinFI* während des Erhärtungsprozesses berücksichtigt (siehe Seite 96 und Abbildung 4.8), kann aus den Messwerten darauf geschlossen werden, dass nur das freie und physikalisch schwach gebundene Wasser bei der 40 °C Darrung aus dem Estrich entweicht und somit mit Hilfe der Feuchte-T₄₀ nur kritische Anteile des Wassers im zementgebundenen Baustoff betrachtet werden. Dabei ist die Feuchte-T₄₀ etwas höher im Vergleich zum Feuchtegehalt der Wasseraufnahme, was erneut auf den Einfluss der Wasserbindungsprozesse im Zementestrich zurückzuführen ist.

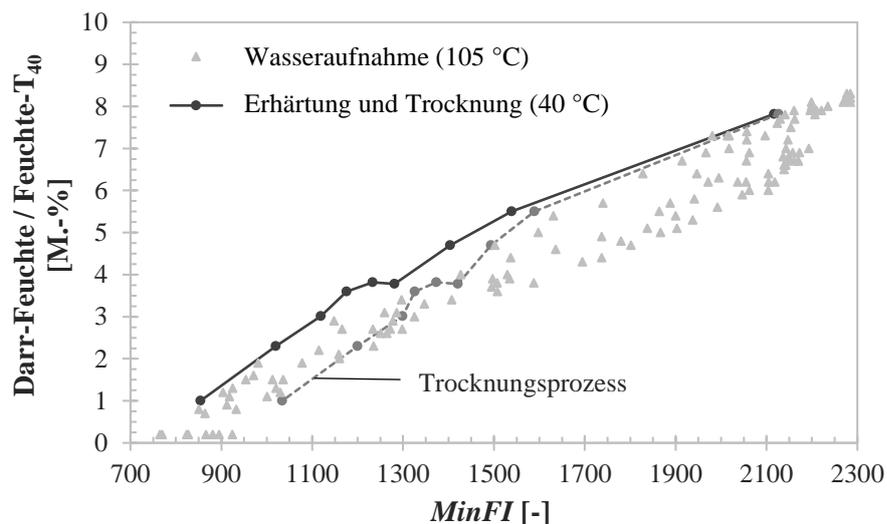


Abbildung 4.13: Vergleich der Messwerte für die Wasseraufnahme (Feuchte) und den Erhärtungs- und Trocknungsprozess (Feuchte-T₄₀).

4.3 Berechnungsmodell zur Ermittlung des Feuchtegehaltes für die Belegreife von Zementestrich

Zur Ermittlung des Feuchtegehaltes von Estrichen ist die CM-Methode das genormte Verfahren, dabei ist die Genauigkeit der CM-Methode im Vergleich zur Darr-Methode kleiner (siehe Abschnitt 2.3.1). In den eigenen Untersuchungen wurden neben den Darr- auch die CM-Feuchten ermittelt, wobei die Streuungen in den Messwerten der CM-Methode sichtbar wurden. Aus diesem Grund werden zur Aufstellung des Berechnungsmodells nicht die CM-Feuchten, sondern die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Feuchte- T_{40} als Referenzwert genutzt. Dabei wird die ermittelte Differenz der CM-Feuchte zur Feuchte- T_{40} von 0,3 CM-% berücksichtigt.

Im Folgenden soll das Berechnungsmodell zur Ermittlung des Feuchtegehaltes von Zementestrichen aus den Mikrowellenmessdaten vorgestellt werden. Die mit dem Modell berechneten Feuchten werden im Weiteren mit den Messwerten der Darr- und CM-Methode verglichen.

4.3.1 Aufstellung des Berechnungsmodells

Die für die Belegreife relevante CM-Feuchte u_{CM} kann mit Hilfe der Feuchte- T_{40} und der Differenz der Feuchte- T_{40} zur CM-Feuchte von 0,3 CM-% mit Hilfe der Gleichung 4.1 abhängig vom gemessenen Feuchteindex $MinFI$ des Sensors R2 berechnet werden. Dabei besitzt das Modell, aufgrund des Einflusses der Eindringtiefe des Sensors, Gültigkeit für Estrichdicken von ca. 40 bis 50 mm.

$$u_{CM} (MinFI) = \underbrace{0,0061 \cdot MinFI - 4,2}_{\text{Feuchte-}T_{40}} - \underbrace{0,3}_{\text{Differenz zur CM-Feuchte}} \quad 4.1$$

Einen Vergleich der CM-Feuchten der Versuchsreihen 35_40, 50_50 und 65_40 mit dem Berechnungsmodell zeigt Abbildung 4.14. Die Messwerte der gewählten Versuchsreihen besitzen dabei aufgrund des in Abschnitt 4.2.2 erarbeiteten Einflusses der Eindringtiefe des Sensors vergleichbare Werte mit der Mikrowellentechnik.

Die Genauigkeit des aufgestellten Berechnungsmodells kann dabei mit einer Standardabweichung von 0,4 CM-% und einem maximalen Fehler von 1,2 CM-% angegeben werden.

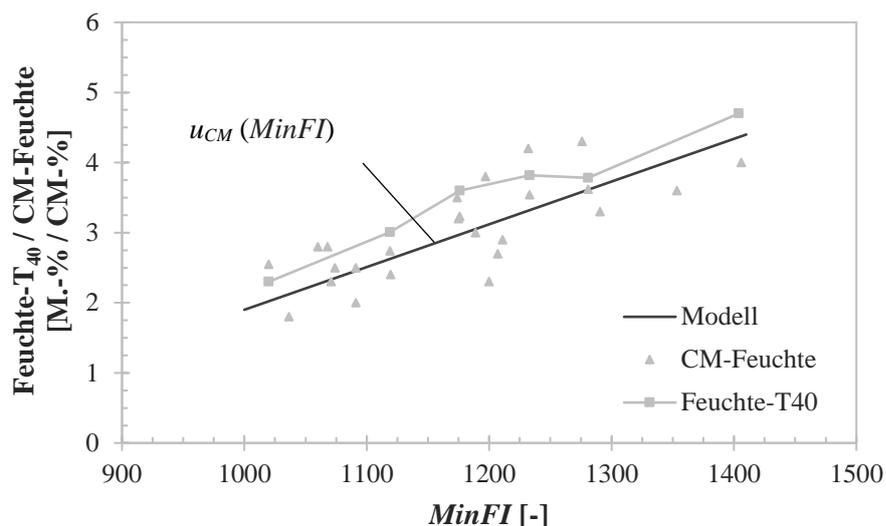


Abbildung 4.14: Vergleich der CM-Feuchten sowie der Feuchte-T₄₀ mit dem Berechnungsmodell.

4.3.2 Korrelation der berechneten Mikrowellenfeuchte mit standardisierten Methoden

Die Aufstellung des Berechnungsmodells erfolgte mit Hilfe von Referenzwerten, welche aufgrund der größeren Genauigkeit die Feuchtegehalte (Feuchte-T₄₀) des Estrichs waren. Im Folgenden soll ein Vergleich der mit Hilfe des Berechnungsmodells errechneten Feuchtegehalte u_{CM} mit den Werten der Darr-Methode (Trocknungstemperatur 105 °C) vorgenommen werden. Zuvor erfolgt eine Gegenüberstellung der Messwerte der zerstörenden Prüfmethode (Darr- und CM-Methode).

Werden die mit Hilfe der Darr- bzw. CM-Methode ermittelten Feuchtegehalte verglichen, so sollten die CM-Feuchten ca. 1,0 bis 1,5 % geringer sein im Vergleich zu den Darr-Feuchten bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C [Sch2]. Abbildung 4.15 zeigt einen Vergleich der gemessenen Darr- und CM-Feuchten des Zementestrichs, wobei die geringeren Werte der CM-Methode deutlich werden. Die CM-Feuchten sind dabei im Mittel ca. 0,8 CM-% geringer als die Darr-Feuchten (105 °C Darrung), welches die oben getroffene Aussage bestätigt.

Die durchgehend geringeren Feuchtwerte der CM-Methode können damit erklärt werden, dass bei einer Darr-Trocknung bei 105 °C das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser aus dem Estrich entweicht. Die CM-Methode erreicht in der vorgesehenen Messdauer von ca. 10 Minuten nur das freie und bestimmte Teile des physikalisch gebundenen Wassers [WTA1]. Die stark gebundenen Anteile des physikalisch gebundenen Wassers werden nicht erreicht, und es kommt im Vergleich zu den Darr-Feuchten zu geringeren Feuchtwerten.

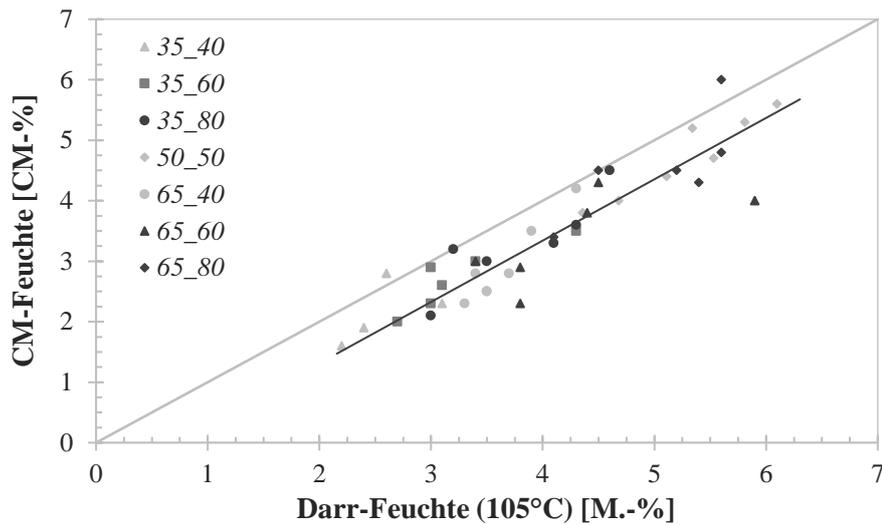


Abbildung 4.15: Vergleich der ermittelten Darrfeuchten (105 °C) und CM-Feuchten.

Abbildung 4.16 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Werte der Darr-Feuchten (105 °C Darrung) und der berechneten Feuchten des Modells. Der dargestellte Vergleich beinhaltet dabei nur die Versuchsreihen, welche zur Aufstellung des Berechnungsmodells dienten und somit vergleichbare Werte besitzen (35_40, 50_50 und 65_40). Da die berechneten Werte des Modells den CM-Feuchten entsprechen, wird erneut die Differenz von ca. 1,0 bis 1,5 CM-% deutlich. Die Darr-Feuchten sind dabei im Mittel ca. 1,3 M.-% größer im Vergleich mit den berechneten Werten des Modells.

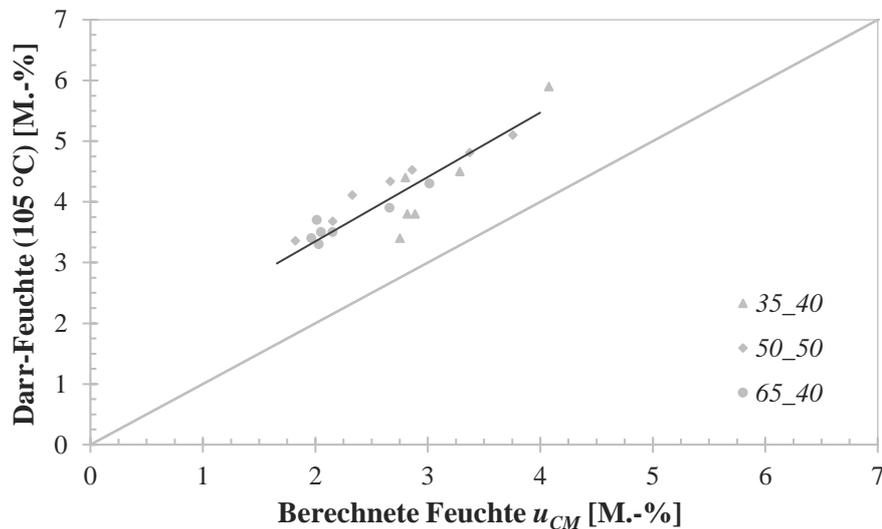


Abbildung 4.16: Vergleich der Darr-Feuchten (105 °C) mit den Werten des Berechnungsmodells (40 °C).

4.4 Zusammenfassung

Die Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung hat gezeigt, dass der Trocknungsverlauf eines Zementestrichs mit Hilfe der Mikrowellentechnik nachvollzogen werden kann. Die Verläufe der gemessenen Feuchteindizes und der Feuchtegehalte zeigen dabei ein kongruentes Verhalten.

In den Untersuchungen wurden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Einflüsse aus der Hydratation des Zementes
- Einflüsse der Eindringtiefe des Sensors
- Zusammenhänge der Feuchtegehalte bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen der Darr-Methode
- Aufstellung eines Berechnungsmodells zur Bestimmung des Feuchtegehaltes

Die Ergebnisse dieser Betrachtung werden im Weiteren zusammenfassend vorgestellt:

Aus der Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung wurden *Einflüsse des Hydratationsprozesses* auf die Feuchteindizes aber auch auf die Darr- bzw. CM-Methode herausgearbeitet. Es konnte gezeigt werden, in welcher Größenordnung sich der Parameter *MinFI* infolge des Erhärtungsprozesses des Zementestrichs ändert. Gleichzeitig wurde deutlich, dass auch eine Änderung der Trockenmasse eines Zementestrichs im Verlauf des Erhärtungsprozesses erfolgt. Dies konnte mit dem Einfluss der Wasserbindung während des Hydratationsprozesses begründet werden.

Bei der Messung der Feuchtegehalte mit Hilfe der Mikrowellentechnik ist die *Eindringtiefe des Sensors* zu beachten. Das Messvolumen des eingesetzten Sensors R2 besitzt eine maximale Eindringtiefe von 50 mm. Wird eine Trocknung über die Oberfläche eines Estrichs untersucht, so entstehen im Querschnitt des Estrichs immer Feuchtegradienten. Der Feuchteindex der Mikrowellentechnik ist ein integraler Wert der Feuchte über die maximale Eindringtiefe. Es wird somit mit dem Sensor R2 die Feuchte der oberen 50 mm des Estrichs betrachtet. Soll der Einfluss der Eindringtiefe des Sensors beseitigt werden, so müssen elektrotechnischen Anpassung des Sensoraufbaus erfolgen, sodass der Sensor die gesamte Dicke des Estrichs messtechnisch erfasst.

In der *Gegenüberstellung der Feuchtegehalte und der Feuchteindizes* wurde deutlich, dass die Mikrowellentechnik das chemische und physikalisch stark gebundene Wasser im Zementestrich nicht erreicht und es somit bei einer Darrung der Probekörper bei 105 °C zu einer Stagnation der Feuchteindizes unterhalb des Feuchtegehaltes von ca. 3,5 bis 4,0 M.-% und zu einer Hysterese in den Desorptions- und Sorptionsprozessen kommt.

Jedoch ist fraglich, ob das physikalisch stark gebundene Wasser im Sinne der Belegreife eine schädigende Wirkung besitzt. Vor diesem Hintergrund wurde die Darrtrocknungstemperatur untersucht, wobei die Mikrowellentechnik zur Beurteilung von kritischen oder unkritischen Wasseranteilen im Zementestrich diente. Darauf aufbauend wurde eine Temperatur von 40 °C für die Darrung von Zementestrichen vorgeschlagen. Bei dieser Trocknungstemperatur konnte ein direkter Zusammenhang der Feuchte- T_{40} mit den Feuchteindizes nachgewiesen werden. Gleichzeitig besitzen die Werte der Feuchte- T_{40} auch die Größenordnung der Feuchten, welche mit Hilfe der CM-Methode ermittelt wurden.

Das aufgestellte *Berechnungsmodell* erlaubt es, den Feuchtegehalt (CM-Feuchte) eines Zementestrichs für die Belegreife abzubilden. Dabei besitzt das Modell eine ausreichende Genauigkeit, es kann eine Standardabweichung der berechneten Werte von den gemessenen von 0,4 CM-% und ein maximaler Fehler von 1,2 CM-% angegeben werden. Damit wird es möglich, die CM-Feuchte des Estrichs mit Hilfe der Mikrowellentechnik zu ermitteln. Gleichzeitig wäre eine Übertragung der Grenzwerte der CM-Methode zur Beurteilung der Belegreife von Zementestrichen auf das Mikrowellenverfahren denkbar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Ergebnisse der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Entwicklung eines Mikrowellenverfahrens zur Untersuchung des Erhärtungs- und Trocknungsprozesses zementgebundener Baustoffe. Schwerpunkt der Untersuchungen war die Herausarbeitung von Zusammenhängen der Messdaten der Mikrowellentechnik mit Kenngrößen der Erhärtung und Trocknung zementgebundener Baustoffe. Dabei wurden verschiedene Mikrowellensensoren und unterschiedliche Auswerteverfahren für die Messdaten der Mikrowellentechnik genutzt.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Untersuchung des Erhärtungsprozesses sowie der Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung dargestellt werden, wobei dazu eine Zusammenfassung der Abschnitte 3.5 und 4.4 erfolgt. Des Weiteren werden allgemeine Aussagen zur Anwendbarkeit der Mikrowellentechnik auf die Untersuchung des Erhärtungs- und Trocknungsprozesses zementgebundener Baustoffe gegeben.

Erhärtungsprozess

- Die Charakterisierung des Erhärtungsprozesses (Hydratation) von Beton mittels Mikrowellentechnik kann mit Hilfe einer einparametrischen Auswertung der Messdaten erfolgen, wobei Zusammenhänge der Änderung der dielektrischen Eigenschaften mit dem w/z-Wert und vor allem mit der Druckfestigkeitsentwicklung des erhärtenden Betons herausgearbeitet werden konnten.
- Die multivariate Auswertung der Messdaten hat erhebliche Abweichungen der prognostizierten Druckfestigkeiten von den Referenzwerten gezeigt, was dazu führt, dass mit den aufgestellten multivariaten Berechnungsmodellen die Druckfestigkeitsentwicklung des Betons nicht nachvollzogen werden kann.
- Aus der Untersuchung der Reproduzierbarkeit und der Abhängigkeit der Parameter vom Erhärtungsprozess wurde die adäquate Kombination aus Sensor und Parameter erarbeitet. So wurde der Streufeld-Resonator R2P in Kombination mit dem Parameter $\Delta MinFI$ identifiziert, welcher im Weiteren zur Aufstellung eines Berechnungsmodells diente.
- Aus einem Vergleich des aufgestellten Berechnungsmodells mit Untersuchungen verschiedener Betonzusammensetzungen konnten Einflussfaktoren auf das Berechnungsmodell identifiziert werden, welche durch die Anpassung der Parameter A , B und C der Gleichung 3.6 kompensiert werden konnten. So besitzen unter-

schiedliche Mengen an Zement, Fließmittel, Frischbetonluftporengehalte über ca. 5,0 Vol.-% und unterschiedliche Mengen an Gesteinskörnung im Beton Einfluss auf das Berechnungsmodell. Hingegen haben verschiedene w/z-Werte, unterschiedliche Zementarten und Frischbetonluftporengehalte bis ca. 5,0 Vol.-% keinen signifikanten Einfluss auf das aufgestellte Berechnungsmodell gezeigt.

- Die Anwendung des Verfahrens in Feldversuchen setzt voraus, dass für eine noch nicht untersuchte Betonzusammensetzung ein separates Berechnungsmodell erstellt wird. Gleichzeitig ist eine Kompensation von Einflüssen aus der Temperatur des Sensors sowie des zu untersuchenden Materials nötig. Im Weiteren können die Messwerte der Mikrowellentechnik zur Überwachung der Druckfestigkeitsentwicklung dienen. Dabei ist eine Anwendung des Verfahrens in Laboren, Fertigteilverken und / oder direkt auf der Baustelle möglich, wobei es zum Beispiel zur Festlegung von Ausschaltungsfristen dienen kann.
- Die Berechnungsmodelle besitzen dabei eine ausreichende Genauigkeit, es kann für die in den eigenen Untersuchungen aufgestellten Berechnungsmodelle eine maximale Abweichung von $\pm 4,5 \text{ N/mm}^2$ für 95 % der berechneten Werte angegeben werden.

Erhärtungs- und Trocknungsprozess

- Die Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung wurde an einem handelsüblichen Estrich durchgeführt. Sie zeigte Einflüsse aus dem Hydratationsprozess auf die Feuchteindizes der Mikrowellenmessung, aber auch auf die Messung der Darr- bzw. CM-Feuchte. So wurde bei der Untersuchung hygri- versiegelter Estrichproben eine Verringerung des Parameters *MinFI* abhängig vom Fortschritt des Erhärtungsprozesses sowie ein Einfluss des Hydratationsprozesses bei der Ermittlung der Trockenmasse bei der Darr-Methode aufgezeigt. Beide Aspekte konnten mit der chemischen Wasserbindung während des Hydratationsprozesses in Verbindung gebracht werden.
- Bei einer zerstörungsfreien Untersuchung des Feuchtegehaltes mittels Mikrowellen- technik ist die Eindringtiefe des genutzten Sensors in das zu untersuchende Material zu beachten. Die maximale Eindringtiefe des in den eigenen Untersuchungen genutzten Sensors liegt bei 50 mm. Sollen Estriche mit Dicken von zum Beispiel 80 mm untersucht werden, so erreicht der Sensor nicht die gesamte Dicke, sondern nur die oberen Schichten des Estrichs. Eine Beseitigung dieses Einflusses der Eindringtiefe des Sensors muss über eine elektrotechnische Anpassung des Sensoraufbaus erfolgen, sodass der Sensor die gesamte vorhandene Dicke des Estrichs messtechnisch erfassen kann. Erfolgt dies, ist eine Vergleichbarkeit der Mikrowellen-

feuchtemessung mit zum Beispiel den gleichmäßig über die Höhe des Estrichs verteilten Werten der Darr- bzw. CM-Methode gegeben.

- Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass es bei einer Darr-Trocknung des Zementestrichs bei einer Temperatur von 105 °C unterhalb eines Feuchtegehaltes von 3,5 bis 4,0 M.-% zu einer Stagnation der Feuchteindizes der Mikrowellenmessung kommt. Bei dieser Trocknungstemperatur von 105 °C wird das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser ausgetrieben. Die Stagnation der Feuchteindizes konnte im Weiteren mit den Wasserbindungsprozessen im Zementestrich erklärt werden, wobei die Mikrowellentechnik nur das freie und physikalisch schwach gebundene Wasser messtechnisch erreicht. Des Weiteren wurde eine Hysterese der Feuchteindizes bei einer Trocknungstemperatur von 105 °C abhängig von den Desorptions- bzw. Sorptionsprozessen im Zementestrich festgestellt.
- Für die Ermittlung der Belegreife eines Estrichs ist fraglich, ob das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser eine schädigende Wirkung besitzt. Vor diesem Hintergrund wurde die Darrtrocknungstemperatur untersucht, wobei die Mikrowellentechnik zur Beurteilung von kritischen oder unkritischen Wasseranteilen im Zementestrich diente. Darauf aufbauend wurde eine Temperatur von 40 °C für die Darrung von Zementestrichen vorgeschlagen. Bei dieser Trocknungstemperatur konnte ein direkter Zusammenhang der Feuchte- T_{40} (Trocknungstemperatur 40 °C) mit den Feuchteindizes nachgewiesen werden. Gleichzeitig besitzen die Werte der Feuchte- T_{40} auch die Größenordnung der Feuchten, welche mit Hilfe der CM-Methode für den Gesamtquerschnitt ermittelt wurden.
- Mit Hilfe der Feuchte- T_{40} konnte ein Berechnungsmodell aufgestellt werden, welches den Feuchtegehalt zur Ermittlung der Belegreife (Bezug CM-Feuchte) abbilden kann. Die Genauigkeit des Berechnungsmodells besitzt dabei eine Standardabweichung von 0,4 CM-% und ein maximaler Fehler von 1,2 CM-%. Der Bezug zur CM-Feuchte würde es im Weiteren auch möglich machen, die Grenzwerte der CM-Methode zur Beurteilung der Belegreife von Zementestrichen auf das Mikrowellenverfahren zu übertragen. Der gefundene Zusammenhang des Berechnungsmodells gilt dabei strenggenommen nur für die in den eigenen Untersuchungen eingesetzte Zusammensetzung des Estrichs.

Anwendbarkeit der Mikrowellentechnik

Zusammenfassend können bezüglich der Anwendbarkeit der Mikrowellentechnik auf die Untersuchung des Erhärtungs- und Trocknungsverhaltens vor allem positive Aspekte genannt werden. So stellt die Messung der Mikrowellen eine Möglichkeit dar, Wasseranteile in zementgebundenen Baustoffen zu detektieren und somit Rückschlüsse auf die Druckfestigkeitsentwicklung und den Feuchtegehalt zu erlangen, ohne den Baustoff zerstören zu müssen. Gleichzeitig kann eine Untersuchung von Bauteilen an mehreren Stellen erfolgen, welches mögliche Streuungen in den Messwerten minimiert. Ein negativer Punkt sind die Einflussfaktoren auf die Mikrowellenmessung. So besitzen Sensor- und Materialtemperatur, aber auch die Ausrichtung und die Eindringtiefe des Sensors Einfluss auf die Messwerte, welches jedoch durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden kann.

5.2 Anregung für eine weitergehende Forschung

Auf Basis dieser Arbeit und dem Stand des Wissens werden folgende weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen:

Erhärtungsprozess

- Verwendung weiterer Zusatzstoffe, wie zum Beispiel Steinkohlenflugasche oder Silikastaub und auch Zusatzmittel zur Validierung des Verfahrens.
- Untersuchungen mit variierenden Anteilen an Zusatzmitteln und Zementmengen im Beton. Damit ist es denkbar, die Abstufung der Faktoren A , B und C der Gleichung 3.6 zu verdeutlichen, welches eine Interpolation der Zwischenwerte ermöglichen könnte.
- Untersuchung von Fließmittel (PCE) im Beton mit einer Messdauer von 28 oder 56 Tagen. Damit wäre eine Nachweismöglichkeit für den Verbleib von polarisierbaren Zusätzen im Beton gegeben.
- Weitergehende Anwendung des Verfahrens in der Praxis, was der Validierung dient und etwaige Einflüsse aus der Praxis aufgezeigt.

Erhärtungs- und Trocknungsprozess

- Untersuchungen des Feuchtegehaltes von Zementestrich mit unterschiedlichen Estrichzusammensetzungen bzw. Herstellern. Dies dient der Validierung des aufgestellten Berechnungsmodells.

- Weiterführende Betrachtung der Feuchte- T_{40} und von kritischen Wasseranteilen im Estrich. Damit könnte das Schadensrisiko im Sinne der Belegreife von Zementestrichen weiter minimiert werden.
- Anwendung des aufgestellten Berechnungsmodells zur Bestimmung der CM-Feuchte in der Praxis. Dies dient der Validierung des erarbeiteten Zusammenhangs der Feuchte- T_{40} und der CM-Feuchte.
- Anwendung von an die Estrichdicke angepasster Sensortechnik. Damit wäre eine Betrachtung des Feuchtegehaltes über die jeweilige gesamte Dicke des Estrichs gegeben.

6 Hinweise für die praktische Anwendung des Mikrowellenverfahrens

Bei der Anwendung der Mikrowellentechnik gibt es allgemein und speziell bei dem Verfahren zur Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton gewisse Aspekte zu beachten. So ist es unumgänglich, um verwertbare Messwerte der Mikrowellentechnik zu erhalten, gewisse Eigenschaften der Sensortechnik zu kennen. Gleichzeitig besitzt das Verfahren zur Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung bestimmte Merkmale bzw. Einflussgrößen. Die relevanten Eigenschaften der Sensortechnik sowie Spezielles zur Messung der Druckfestigkeitsentwicklung soll im Folgenden näher erläutert werden.

6.1 Eigenschaften der Sensortechnik

Einfluss der Sensor- und Materialtemperatur

Wie aus Abschnitt 3.3.6 zu entnehmen ist, besitzt die Temperatur des Sensors aber auch des zu untersuchenden Materials Einfluss auf die Mikrowellenmesswerte. Gerade bei Untersuchungen, welche direkt auf der Baustelle durchgeführt werden, kann der Einfluss der Temperatur zu Problemen führen. Soll zum Beispiel bei einem Messobjekt der Feuchtegehalt bei einer Außentemperatur von 10 °C bestimmt werden, so besitzt einerseits die Temperatur des Messobjektes aber auch die der Sensortechnik Einfluss auf das Messergebnis. Die niedrige Temperatur des zu untersuchenden Messobjektes muss bei der Auswertung kompensiert werden. Die Sensortechnik besitzt bei Temperaturen unterhalb von ca. 15 °C erhebliche Schwankungen, jedoch kann der optimale Sensortemperaturbereich von 20 bis 30 °C mit einem einfachen Mittel eingestellt werden. Die Sensoren erzeugen und halten Wärme, wenn sie an ein Steuergerät (Handgerät oder Rechner) angeschlossen sind. Indem der Sensor vor der Messung an einen warmen Ort gestellt oder kurz in die Hand genommen wird, kann der optimale Bereich der Sensortemperatur eingestellt werden.

Ausrichtung und Eindringtiefe der Sensortechnik

Die eingesetzten Mikrowellensensoren besitzen ein elektromagnetisches Streufeld (Streufeld-Resonator und Koax) oder senden die Mikrowellen direkt in das zu untersuchende Material (Patch-Antenne). Dabei wird ein bestimmtes Messvolumen erreicht, wobei dieses Messvolumen sensorspezifisch ist und sich meist nicht symmetrisch um den Mittelpunkt des Sensorkopfes ausbildet, sodass, sollen vergleichbare Messwerte erzeugt werden, die Ausrichtung des Sensors zu beachten ist. Gerade bei inhomogenen Messobjekten, wie zum Beispiel Mauerwerk mit Mörtel und

Steinanteilen, sind die Eigenschaften der Materialien unterschiedlich und es kann zu Problemen bei der Interpretation der Messdaten kommen. Eine einfache Möglichkeit, um diesen Einfluss bei Wiederholungsmessungen auszuschließen, ist eine Festlegung der Ausrichtung des Sensorkopfes (z. B. Markierung oben).

Die verschiedenen Mikrowellensensoren besitzen unterschiedliche Eindringtiefen in das Messgut. Abhängig vom Sensoraufbau wird die Tiefe des Messvolumens eingestellt, gleichzeitig ist die Eindringtiefe der Mikrowellen von der Dichte und Feuchte des Materials abhängig, wobei eine genaue Aussage zur Messtiefe bei jeder Einzelmessung kaum möglich ist.

Statistische Auswertung von Untersuchungen

Bei der zerstörenden Feuchteuntersuchung wird meist nur eine Stelle zur Ermittlung des Feuchtegehaltes genutzt. Die zerstörungsfreie Feuchtemessung mit Hilfe der Mikrowellentechnik kann an mehreren Messstellen erfolgen, wobei eine Vielzahl von Messstellen auch eine statistische Sicherheit bei der Auswertung der Messdaten erzeugt. Es können Messfehler aufgezeigt und Prüfstreuungen mit Hilfe einer Mittelwertbildung kompensiert werden. Aufgrund der Möglichkeit eine Vielzahl an Messstellen zu untersuchen, ist gleichzeitig auch eine Untersuchung der flächigen Feuchteverteilung zum Beispiel in einem Estrich und somit eine Detektion von Feuchteansammlungen möglich.

6.2 Untersuchung der Druckfestigkeitsentwicklung von Beton

Bei der Untersuchung des Erhärtungsprozesses zementgebundener Baustoffe mittels Mikrowellentechnik können die Sensoren nicht direkt auf das zu untersuchende Material appliziert werden. Die Kopplung der Sensortechnik mit dem Medium erfolgt über einen Flansch, wobei dieser Flansch die Sensoren vor dem alkalischen Milieu des Betons schützt. Der Flansch kann dabei direkt in die Schalung eingebaut werden, was eine Untersuchung von Wandbauteilen problemlos möglich macht. Bei Deckenkonstruktionen ist jedoch meist nur die Randabschalung nutzbar.

Für das Verfahren ist es notwendig, dass die Messstellen in einem Bereich des Bauteils gewählt werden, welcher eine hygriech versiegelte Untersuchung des Erhärtungsprozesses des Betons möglich macht. Erfolgt eine zusätzliche Trocknung, so äußert sich das in der Änderung der Feuchteindizes der Mikrowellenmessung und eine Aussage zur Entwicklung der Druckfestigkeit ist nicht möglich.

Bei der Aufstellung der Berechnungsmodelle wurde mit Hilfe einer Funktion der Druckfestigkeitsverlauf bestimmt und im Weiteren jeder Mikrowellenmessung ein

Referenzwert zugeordnet. Dabei wurde der erste Wert der Referenzdruckfestigkeiten nach einem Tag ermittelt, hingegen die Mikrowellenmessung direkt nach dem Einbau des Betons in die Versuchsanordnung gestartet werden konnte. Für die Messungen innerhalb des ersten Tages nach der Betonage stehen keine Referenzwerte zur Verfügung, somit ist in diesem Zeitraum ein Einfluss der Regressionsfunktion denkbar. Da der funktionelle Zusammenhang der Gleichung 2.14 jedoch schon mehrfach in anderen Arbeiten erprobt wurde, wird der Einfluss der Regressionsfunktion in den eigenen Untersuchungen als eher gering betrachtet.

Bei der Untersuchung der Betonerhärtung in Bauteilen ist in den meisten Fällen aus statischer oder konstruktiver Sicht eine Bewehrung im Beton vorhanden. Dabei kann die Bewehrung das Mikrowellensignal beeinflussen oder gänzlich stören. Es muss somit eine geeignete Messstelle gewählt werden, bei welcher keine Interaktion der Mikrowellen mit der Bewehrung stattfinden kann. Aufgrund des relativ geringen Messvolumens des Sensors R2P stellt dies jedoch kein Problem bei der praktischen Anwendung des Mikrowellenverfahrens dar.

Literaturverzeichnis

- [DIN12390-3] *DIN EN 12390-3*, Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern: Deutsches Institut für Normung e.V., 09.2017.
- [DIN12570] *DIN EN ISO 12570*, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur: Deutsches Institut für Normung e.V., 09.2013.
- [DIN13892-2] *DIN EN 13892-2*, Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen Teil 2: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit: Deutsches Institut für Normung e.V., 02.2003.
- [DIN18560-1] *DIN 18560-1*, Estriche im Bauwesen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung: Deutsches Institut für Normung e.V., 11.2015.
- [Aur1] *Aurnhammer, K. G.* (2008): Schäden an Estrichen. Mit 25 Tabellen. 3. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag (Schadenfreies Bauen, 15).
- [Bam1] *Bamberg, G.; Baur, F.; Krapp, M.* (2012): Statistik. 16., überarb. Aufl. München: Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- [Ben1] *Benedix, R.* (2015): Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. 6. vollst. überarb. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [Bob1] *Bobrov, P. P.; Lapina, A. S.; Golikov, N. A.; Repin, A. V.; Shumskayte, M. Y.* (Hg.) (2016): Hysteresis of the NMR Response and of the Complex Relative Permittivity of Sandstones During the Water Imbibition and Drainage. Unter Mitarbeit von Olmi R. und Bittelli M. ISEMA 2016: proceedings of the 11th International conference on electromagnetic wave interaction with water and moist substances. Florenz, Italien, 23.-27. Mai 2016.
- [But1] *Buttress, A.; Jones, A.; Kingman, S.* (2015): Microwave processing of cement and concrete materials – towards an industrial reality? In: Cement and Concrete Research 68, S. 112–123.
- [Det1] *Detlefsen, J.; Siart, U.* (2012): Grundlagen der Hochfrequenztechnik. Online-Ausg. München: Oldenbourg (Technik 10-2012).
- [Dol1] *Dollase, A.; Möller, U.; Nietner, L.* (2019): Microwave Monitoring Methode for Detecting the Hydration Process of Concrete, SMSS 2019: proceedings of the RILEM spring convention and sustainable materials, systems and structures conference. Rovinj, Kroatien 18.-22. März 2019.
- [Eng1] *Englert, G.; Wittmann, F.* (1968): Water in hardened cement paste. In: Matériaux et Constructions 1 (6), S. 535–546.
- [Fel1] *Feldman, R. F.; Sereda, P. J.* (1968): A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. In: Matériaux et Constructions 1 (6), S. 509–520.

- [Gir1] *Girod, B.; Rabenstein, R.; Stenger, A. (2007): Einführung in die Systemtheorie. Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik; 4. durchges. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Teubner.*
- [Göl1] *Göller, A. (Hg.) (1999): Handheld-Mikrowellen-Feuchtemessgeräte der MOIST-Serie – Anwendungen und Einsatzfälle im Bausektor. Feuchtetag '99. BAM, Berlin, 07.-08.10.1999. DGZfP-Berichtband.*
- [Göl2] *Göller, A. (2007): Mikrowellenbasierte Feuchtemessung im Raster. hf sensor GmbH, Leipzig. Online verfügbar unter http://www.marag.ch/de/feuchtemesstechnik/feuchtemessung_bau/content.htm/pdf_feuchte.pdf*
- [Grü1] *Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S. (2001): Beton. Arten Herstellung Eigenschaften. 2. Aufl. Berlin: Ernst (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau).*
- [Han1] *Hansen, T. C. (1965): Surface cracking of mass concrete structures at early form removal. RILEM-Bulletin, No. 28.*
- [Häu1] *Häupl, P.; Homann, M.; Kölzow, C.; Riese, O.; Maas, A.; Höfker, G. et al. (2013): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 7. vollst. überarb. u. aktual. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).*
- [Hol1] *Holtmann, D. (2010): Grundlegende multivariate Modelle der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse. 3. veränd. Aufl. Potsdam: Univ.-Verl.*
- [IFB1] *Böhmer, H.; Simon, J.; Helmbrecht, H. (2015): Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenskosten. Institut für Bauforschung e.V., IFB – 14553*
- [Jam1] *Jamil, M.; Hassan, M. K.; Al-Mattarneh, H. M. A.; Zain, M. F. M. (2013): Concrete dielectric properties investigation using microwave non-destructive techniques. In: Materials and Structures 46 (1), S. 77–87.*
- [Jon1] *Jonasson, J.-E. (1984): Slipform construction – calculation for assessing protection against early freezing. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm*
- [JSC1] *Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1986): Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures, Part 2.*
- [Käm1] *Kämpf, G.; Kohlschütter, H. W. (1958): Physikalische und chemische Eigenschaften des Systems Silicagel/Wasser. II. Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften wasserbeladener Silicagele im Frequenzgebiet 100 Hz - 300 kHz. In: z. Anorg. Allg. Chem. 294 (1-2), S. 10–21.*
- [Kei1] *Keil, F. (1971): Zement. Herstellung und Eigenschaften. Berlin: Springer.*
- [Kes1] *Kessler, W. (2007): Multivariate Datenanalyse. Für die Pharma- Bio- und Prozessanalytik; ein Lehrbuch. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.*

- [Knö1] *Knöchel, R.; Daschner, F.; Taute, W. (Hg.) (1999): Mikrowellen-Sensor zur präzisen Feuchtemessung an Bauteilen und Baustoffen. Feuchtetag '99. BAM, Berlin, 07.-08.10.1999. DGZfP-Berichtsband.*
- [Kön1] *Königer, F.; Schuhmann, R. (Hg.) (2016): Monitoring Screed Curing using TDR Sensors. Unter Mitarbeit von Olmi R. und Bittelli M. ISEMA 2016: proceedings of the 11th International conference on electromagnetic wave interaction with water and moist substances. Florenz, 23.-27. Mai 2016.*
- [Kru1] *Krus, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Stuttgart, Univ., Dissertation*
- [Kru2] *Kruschwitz, S.; Nagel, S.; Strangfeld, C.; Wöstmann, J.; Borchardt, K. (2018): Eignung zerstörungsfreier Messtechnik für die Bestimmung der Belegreife von Estrichen. In: Bautechnik 95 (4), S. 265–274.*
- [Kru3] *Kruschwitz, S.; Strangfeld, C.; Wöstmann, J. (Hg.) (2016): Measuring Screed Moisture with EM Methods – A Comparison of Capacitive Handheld. Unter Mitarbeit von Olmi R. und Bittelli M. ISEMA 2016: proceedings of the 11th International conference on electromagnetic wave interaction with water and moist substances. Florenz, 23.-27. Mai 2016.*
- [Kup1] *Kupfer, K. (1997): Materialfeuchtemessung. Grundlagen Messverfahren Applikationen Normen; mit 19 Tabellen und 386 Literaturstellen. Renningen-Malmsheim: expert-Verl. (Kontakt + Studium, 513).*
- [Loc1] *Locher, F. W. (2000): Zement. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik.*
- [Mak1] *Makul, N.; Rattanadecho, P.; Agrawal, D. K. (2014): Applications of microwave energy in cement and concrete – A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 37, S. 715–733.*
- [Man1] *Mandry, W. (1961): Über das Kühlen von Beton. Springer Verlag, Berlin.*
- [Mar1] *Marx, W. (1987): Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation. Mitteilung des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 64.*
- [Mau1] *Mauritz, K. A. (2017): Darstellung der Frequenzabhängigkeit unterschiedlicher dielektrischer Mechanismen anhand der reellen und imaginären Anteile der Permittivität. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dielectric_responses_DE.svg, zuletzt aktualisiert am 01.03.2019.*
- [McC1] *McCafferty, E.; Zettlemoyer, A. C. (1971): Adsorption of water vapour on α -Fe₂O₃. In: Discuss. Faraday Soc. 52 (0), S. 239–254.*
- [Mos1] *Moschig, G. (2010): Bausanierung: Grundlagen – Planung – Durchführung: Vieweg+Teubner Verlag. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=AVcpBAAQBAJ>.*

- [Mou1] *Mouhasseb, H.* (2007): Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens. Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000008175/359243>.
- [Pri1] *Princz, S.* (2012): Online-Bestimmung des Ethanol- und Glucosegehalts in einem Laborfermenter mit Hilfe der NIR-Spektroskopie und multivariater Datenanalyse: Master-Thesis.
- [Roe1] *Roessler, I.; Ungerer, A.* (2017): Kommentierte Formelsammlung multivariater statistischer Verfahren. Online verfügbar unter www.prof-roessler.de/Dateien/Statistik/multivariat.pdf, zuletzt aktualisiert am 01.03.2019.
- [Röh1] *Röhling, S.* (2009): Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme. 2. durchges. u. erw. Aufl. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik (Edition Beton).
- [Röh2] *Röhling, S.* (2012): Betonbau, Band 2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- [Röh3] *Röhling, S.; Eifert, H.; Jablinski, M.* (2012): Betonbau, Band 1. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- [Röh4] *Röhling, S. et al.* (1985): Monolithischer Betonbau. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [Rol1] *Rolof, H.-J.* (2010): Fußbodenschäden im Bild. Betonböden Estriche Bodenbeläge Beschichtungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Ron1] *Ronniger, C. U.* (2013): Taschenbuch der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden. Die wichtigsten Methoden und Verfahren für die Praxis. 1. Aufl. München: [CRGRAPH].
- [Ros1] *Rostasy, F. S.; Krauß, M.* (2001): Frühe Risse in massigen Betonbauteilen – Ingenieurmodelle für die Planung von Gegenmaßnahmen. Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau, Heft 520, Beuth Verlag, Berlin.
- [Rze1] *Rzepecka, M. A.; Hamid, M. A. K.; Soliman, A. H.* (1972): Monitoring of Concrete Curing Process by Microwave Terminal Measurements. In: IEEE Trans. Ind. Electron. Control Instrum. IECI-19 (4), S. 120–125.
- [Sch1] *Schmidt, J.* (1991): Einsatz von Mikrowellenmesstechnik zur zerstörungsfreien und kontinuierlichen Erfassung der Reaktionskinetik von Mörteln und Betonen. In: Symposium Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen.
- [Sch2] *Schnell, W.* (1985): Zur Ermittlung der Belegreife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen. In: Boden Wand Decke, Heft 1/1985
- [Sha1] *Shalaby, W.; Zoughi, R.* (1995): Microwave compressive strength estimation of cement paste using monopole probes. In: Research in Nondestructive Evaluation 7 (2), S. 101–115.
- [She1] *Shen, P.; Lu, L.; He, Y.; Wang, F.; Hu, S.* (2016): Hydration monitoring and strength prediction of cement-based materials based on the dielectric properties. In: Construction and Building Materials 126, S. 179–189.

- [Sie1] *Siebel, E.* (2005): Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Sachstandsbericht. 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 560).
- [Sok1] *Sokoll, T.* (2008): Mikrowellensysteme für die in-situ-Feuchtemessung zur Bauwerksüberwachung. Zugl.: Hamburg, Techn. Univ., Dissertation
- [Sta1] *Stark, J.* (2001): Neue Ansätze zur Zementhydratation – Teil 1. ZKG INTERNATIONAL – (Volume 54) No. 1/2001
- [Sta2] *Stark, J.; Wicht, B.* (2000): Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff; mit 90 Tabellen. Basel: Birkhäuser (Baupraxis).
- [Sta3] *Stark, J.; Wicht, B.* (2013): Dauerhaftigkeit von Beton. 2. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [Suz1] *Suzuki, Y.; Harada, S.; Maekawa, K.; Tsuji, Y.* (1988): Evaluation of Adiabatic Temperature Rise of Concrete Measured with the New Testing Apparatus. Proceedings of JSCE, No. 396.
- [Tim1] *Timm, H.* (2013): Estriche und Bodenbeläge. Arbeitshilfen für die Planung Ausführung und Beurteilung. 5. überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [Tis1] *Tischer, F. J.* (1958): Mikrowellen-Meßtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [VDZ1] *Verein Deutscher Zementwerke* (2002): Zement-Taschenbuch. 50. Ausgabe.
- [Web1] *Weber, J. W.; Weschke, K.* (1978): Entwicklung eines Verfahrens zur Vorausbestimmung der Druckfestigkeit von Normal- und Leichtbetonen in Abhängigkeit von den Matrix- und Zuschlageigenschaften unter Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2783. Westdeutscher Verlag, Opladen.
- [Wen1] *Wentura, D.; Pospeschill, M.* (2015): Multivariate Datenanalyse. Eine kompakte Einführung. Wiesbaden: Springer.
- [Wer1] *Wernecke, R.* (2003): Industrielle Feuchtemessung. Grundlagen Messmethoden technische Anwendungen. Weinheim: Wiley-VCH.
- [WTA1] *Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege* (2016): Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Ausgabe: 03.2016/D, deutsche Fassung vom März 2016. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (WTA-Merkblatt, 4-11/D).
- [Wit1] *Wittmann, F. H.* (1973): Interaction of Hardened Cement Paste and Water. In: American Ceramic Society 56 (8), S. 409–415.
- [Xia1] *Xiao, L.; Li, Z.* (2008): Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement. In: Cement and Concrete Research 38 (3), S. 312–319.
- [Zha1] *Zhang, J.; Qin, L.; Li, Z.* (2009): Hydration monitoring of cement-based materials with resistivity and ultrasonic methods. In: Materials and Structures 42 (1), S. 15–24.

Anhang

Anhang A Eigenschaften des Betons

A.1 Entwicklungsfunktionen für die Eigenschaften von Beton

Modellfunktionen zur Beschreibung der Eigenschaftsentwicklung von Beton [Röh1]:

Modellfunktion I:
$$P(t) = P_{max} \cdot e^{A \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^B}$$

Modellfunktion II:
$$P(t) = P_{max} \cdot e^{a \cdot \left(\ln\left(1 + \frac{t}{t_k}\right)\right)^b}$$

Modellfunktion III:
$$P(t) = P_{max} \cdot \left(1 - e^{-r \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^s}\right)$$

Modellfunktion IV:
$$P(t) = P_{max} \cdot \frac{a_1 \cdot t^{b_1}}{1 + a_2 \cdot t^{b_2}}$$

Tabelle A.1.1: Nutzung der Regressionsparameter verschiedener Autoren [Röh1].

Modell	Autor	A, a, r	B, b, s	t_k
I	WEBER ET AL. [Web1]	variabel	variabel	1
I	HANSEN [Han1]	-1	variabel	variabel
I	RÖHLING ET AL. [Röh4]	variabel	variabel	variabel
II	JONASSON [Jon1]	variabel	variabel	variabel
II	ROSTASY ET AL. [Ros1]	-1	variabel	variabel
III	MANDRY [Man1]	1	1	variabel
III	JAPAN SOC. OF CIV. ENG. [JSC1]	variabel	1	1
III	SUZUKI ET AL. [Suz1]	variabel	variabel	1
III	MARX [Mar1]	1	variabel	variabel

A.2 Verwendete Betonzusammensetzungen und Frischbetoneigenschaften

Tabelle A.2.1: Zusammensetzung der untersuchten Betone.

Bezeichnung	Zement		Wasser	Gesteinskörnung (A/B 16)	Fließmittel	Luftporenbildner
	Art	Menge				
		kg/m ³			% vom Zement	
045	CEM I 42,5 R	400	180	1738	/	/
050	CEM I 42,5 R		200		/	/
055	CEM I 42,5 R		220		/	/
CEM II	CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R		200		/	/
CEM III	CEM III/A 42,5 N-NA		200		/	/
360	CEM I 42,5 R	360	180	1825	/	/
440	CEM I 42,5 R	440	220	1651	/	/
FM	CEM I 42,5 R	400	180	1738	0,5	/
LP 1/2	CEM I 42,5 R		200		/	0,6
LP 3/4	CEM I 42,5 R		200		/	1,0

Tabelle A.2.2: Ermittelte Frischbetoneigenschaften der Versuchsreihen.

Variation	Versuchsreihe	Ausbreitmaß [mm]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Frischbetonrohddichte [kg/dm ³]
w/z-Wert	<i>045_1</i>	38,0	2,0	2,394
	<i>045_2</i>	35,5	2,1	2,346
	<i>045_3</i>	37,0	2,7	2,351
	<i>050_1</i>	55,0	1,4	2,350
	<i>050_2</i>	50,0	1,4	2,368
	<i>050_3</i>	47,0	1,0	2,353
	<i>055_1</i>	60,0	0,9	2,353
	<i>055_2</i>	56,0	1,7	2,329
	<i>055_3</i>	60,5	0,9	2,350
Zement- menge	<i>360_1</i>	33,0	2,3	2,363
	<i>360_2</i>	35,0	2,3	2,379
	<i>360_GK</i>	37,0	2,6	2,336
	<i>440_1</i>	54,0	1,9	2,304
	<i>440_2</i>	54,0	2,3	2,347
Zementart	<i>CEM II_1</i>	44,0	1,5	2,351
	<i>CEM II_2</i>	49,0	1,8	2,327
	<i>CEM III_1</i>	42,0	1,6	2,330
	<i>CEM III_2</i>	46,5	1,9	2,343
Zusätze	<i>FM_1</i>	56,0	2,2	2,361
	<i>FM_2</i>	54,0	1,8	2,308
	<i>LP_1</i>	55,5	4,8	2,240
	<i>LP_2</i>	57,0	5,3	2,209
	<i>LP_3</i>	57,5	8,0	2,182
	<i>LP_4</i>	55,5	8,0	2,152

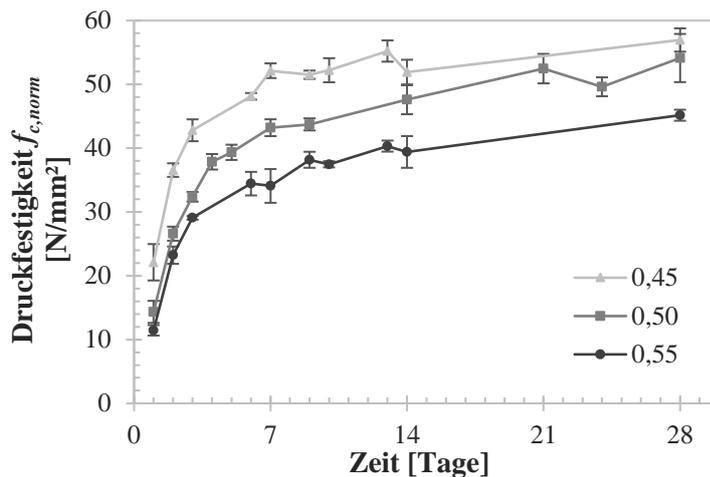


Abbildung A.3.1: Gemittelte normierte Druckfestigkeit für die Versuchsreihen mit verschiedenen w/z-Werten (0,45; 0,50 & 0,55).

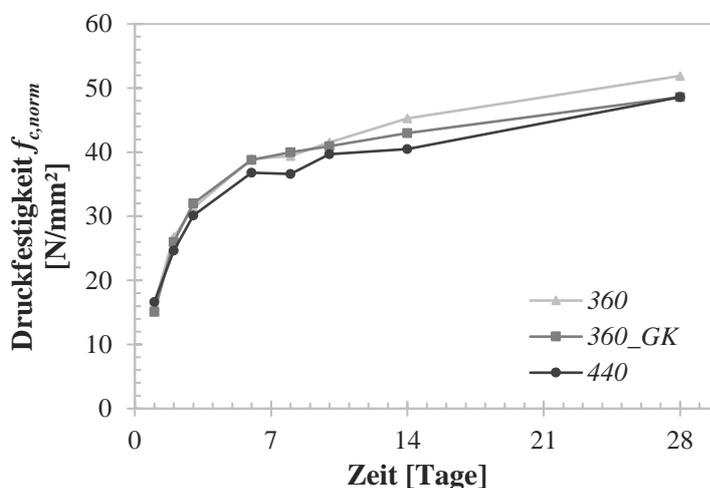


Abbildung A.3.2: Normierte Druckfestigkeit für die Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zementanteilen (360 & 440 kg/m³).

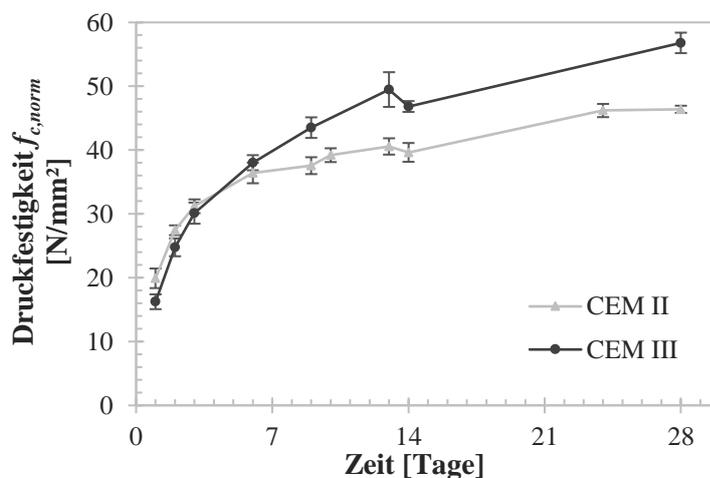


Abbildung A.3.3: Gemittelte normierte Druckfestigkeit für die Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zementarten (CEM II & CEM III).

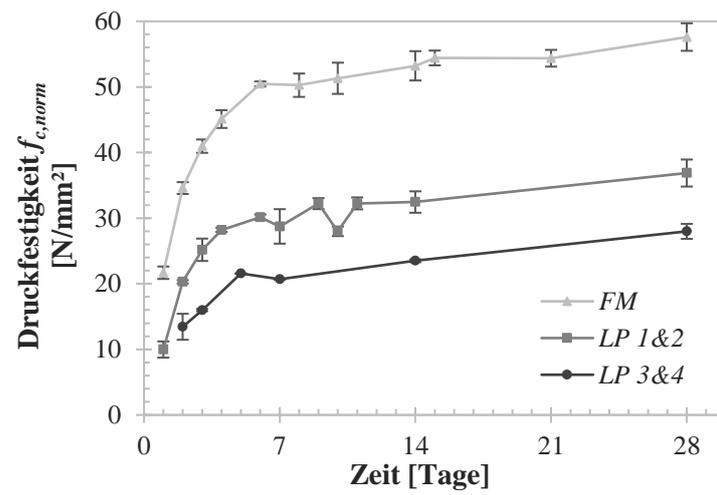


Abbildung A.3.4: Gemittelte normierte Druckfestigkeit für die Versuchsreihen unter Verwendung von Zusätzen (FM & LP).

Anhang B Eigenschaften des Estrichs

B.1 Technisches Merkblatt des verwendeten Estrichs

TECHNISCHES MERKBLATT



SAKRET Beton - Estrich		BE																																
Hydraulisch erhärtender, zementärer Trockenmörtel C 25/30 gemäß DIN EN 206-1, DIN 1045-2; CT-C30-F5 gemäß DIN EN 13813.																																		
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • zur Herstellung von Beton und Stahlbeton nach DIN 1045-2 / DIN EN 206-1 • als Verbundestrich nach DIN EN 13813 • als Schwimmender Estrich nach DIN EN 13813 • als Heizestrich nach DIN EN 13813 																																	
Eignung	<ul style="list-style-type: none"> • innen und außen • Boden 																																	
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • wasserfest • hydraulisch abbindend • alterungsbeständig • frostwiderstandsfähig • geschmeidig, gut ziehbar • für Fußbodenheizung geeignet • hand- und maschinenverarbeitbar mit Estrichpumpe oder Durchlaufmischer 																																	
Materialbasis	Zement- DIN 197, und ausgesuchte Zuschlagsstoffe EN 13139 / DIN EN 12620, sowie Zusatzmittel zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften																																	
Technische Daten	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Beton C 25/30 XC4 / XF1 nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Anmachwasser für 30 kg</td> <td>ca. 2,7 Liter</td> </tr> <tr> <td>Konsistenzbereich</td> <td>F1 bis F2 je nach Wasserzugabe</td> </tr> <tr> <td>Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung</td> <td>XC1, XC2, XC3, XC4</td> </tr> <tr> <td>Betonkorrosion durch Frostangriff</td> <td>XF1</td> </tr> <tr> <td>Betonkorrosion infolge Alkali- Kieselsäure- Reaktion</td> <td>WO, WF</td> </tr> <tr> <th colspan="2">Estrich EN 13813, CT C30-F 5 nach DIN EN 13813</th> </tr> <tr> <td>Anmachwasser für 30 kg</td> <td>ca. 2,4 Liter</td> </tr> <tr> <td>Verarbeitungszeit</td> <td>ca. 1 Stunde</td> </tr> <tr> <td>Voll belastbar</td> <td>nach ca. 28 Tagen</td> </tr> <tr> <td>Druckfestigkeit</td> <td>≥ 30 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Biegezugfestigkeit</td> <td>≥ 5 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Verarbeitungstemperatur</td> <td>+ 5 °C bis + 30 °C (Luft, Objekt, Material)</td> </tr> <tr> <td>Baustoffklasse</td> <td>A1- DIN EN 13501-1 (nicht brennbar)</td> </tr> <tr> <td>Korngröße</td> <td>8 mm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Technische Werte beziehen sich auf die Herstellung bei 20°C / 50% rel. Luftfeuchtigkeit</td> </tr> </tbody> </table>		Beton C 25/30 XC4 / XF1 nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2		Anmachwasser für 30 kg	ca. 2,7 Liter	Konsistenzbereich	F1 bis F2 je nach Wasserzugabe	Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung	XC1, XC2, XC3, XC4	Betonkorrosion durch Frostangriff	XF1	Betonkorrosion infolge Alkali- Kieselsäure- Reaktion	WO, WF	Estrich EN 13813, CT C30-F 5 nach DIN EN 13813		Anmachwasser für 30 kg	ca. 2,4 Liter	Verarbeitungszeit	ca. 1 Stunde	Voll belastbar	nach ca. 28 Tagen	Druckfestigkeit	≥ 30 N/mm ²	Biegezugfestigkeit	≥ 5 N/mm ²	Verarbeitungstemperatur	+ 5 °C bis + 30 °C (Luft, Objekt, Material)	Baustoffklasse	A1- DIN EN 13501-1 (nicht brennbar)	Korngröße	8 mm	Technische Werte beziehen sich auf die Herstellung bei 20°C / 50% rel. Luftfeuchtigkeit	
Beton C 25/30 XC4 / XF1 nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2																																		
Anmachwasser für 30 kg	ca. 2,7 Liter																																	
Konsistenzbereich	F1 bis F2 je nach Wasserzugabe																																	
Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung	XC1, XC2, XC3, XC4																																	
Betonkorrosion durch Frostangriff	XF1																																	
Betonkorrosion infolge Alkali- Kieselsäure- Reaktion	WO, WF																																	
Estrich EN 13813, CT C30-F 5 nach DIN EN 13813																																		
Anmachwasser für 30 kg	ca. 2,4 Liter																																	
Verarbeitungszeit	ca. 1 Stunde																																	
Voll belastbar	nach ca. 28 Tagen																																	
Druckfestigkeit	≥ 30 N/mm ²																																	
Biegezugfestigkeit	≥ 5 N/mm ²																																	
Verarbeitungstemperatur	+ 5 °C bis + 30 °C (Luft, Objekt, Material)																																	
Baustoffklasse	A1- DIN EN 13501-1 (nicht brennbar)																																	
Korngröße	8 mm																																	
Technische Werte beziehen sich auf die Herstellung bei 20°C / 50% rel. Luftfeuchtigkeit																																		

TECHNISCHES MERKBLATT



SAKRET Beton - Estrich

BE

Untergrundvorbereitung	<p>Beton:</p> <ul style="list-style-type: none"> • nur nicht- oder schwach saugende Schalungen verwenden • bei bewehrtem Beton für ausreichende Überdeckung der Bewehrung sorgen (Abstandhalter) • bei großflächigen Bauteilen Fugenabstände beachten • Schalungen ausreichend mit Trennmitteln vorbehandeln <p>Estrich:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Untergrund sollte fest, tragfähig und frei von Rissen sein • minderfeste Oberflächenschichten und Trennschichten (Schmutz, Staub, Fett, Öl, Farbreste u. ä.) entfernen • extrem dichte und/oder glatte Untergründe, Zementschlämmen und nicht tragfähige Oberflächenschichten müssen entfernt bzw. aufgearbeitet werden (z.B. Blastrac-Verfahren) • Untergrund ausreichend vornässen oder mit SAKRET Universalgrundierung UG vorstreichen • in Zweifelsfällen Probeflächen anlegen, ggf. Beratung bei SAKRET anfordern
Verarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • SAKRET Beton- Estrich BE in einem sauberen Gefäß oder Mischer mit kaltem Leitungswasser knollenfrei und homogen anmischen • Wasserzugabe je nach Konsistenzbereich (siehe technische Daten) • Beton homogen in Schalung einbringen und verdichten • Estrich je nach Schichtdicke auftragen, verdichten, abziehen und glätten • Schalzeiten gemäß EN 206 beachten • Bewegungsfugen nicht mit Beton überdecken
Nachbehandlung	<p>Frische Beton- und Estrichflächen in den ersten Tagen vor Witterungseinflüssen wie Sonne, Wind und Frost schützen. Beton und Estrich bis zu sieben Tage feucht nachbehandeln, z.B. durch Abhängen mit Folien oder nassen Jutesäcken, durch Besprühen mit Wasser oder durch Aufbringen geeigneter Nachbehandlungsmittel.</p>
Materialverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • 30 kg SAKRET Betonestrich BE ergeben sich ca. 15 Liter Frischbeton, dies reicht bei einer Estrichdicke von 40 mm für ca. 0,375 m³ • ca. 20 kg/m²/cm
Lieferform	<ul style="list-style-type: none"> • in mehrlagigen Papiersäcken mit Folieneinlage • a 30 kg – 42 Stück auf der Palette
Lagerung	<ul style="list-style-type: none"> • witterungsgeschützt, frostfrei, kühl und trocken und angebrochene Gebinde sofort verschließen • bei sachgerechter Lagerung für 12 Monate ab Herstellungsdatum, • chromatarnt gemäß Richtlinie 2003/53/EG, GISCODE ZP1
Entsorgung	<p>ausgehärtete Produktreste unter Abfallschlüssel 17 09 04 als Bauschutt</p>

TM BE • Seite 2 von 3

TECHNISCHES MERKBLATT



SAKRET Beton - Estrich

BE

Hinweise

- die technischen Daten beziehen sich auf + 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit. Tiefere Temperaturen verlängern, höhere verkürzen die angegebenen Werte
- den abbindenden SAKRET Beton- Estrich BE vor Sonneneinstrahlung, Zugluft, Frost, Schlagregen und zu hohen Temperaturen (> +30 °C) schützen
- bereits abbindendes Material darf mit Wasser nicht nachverdünnt werden
- es gelten die Anforderungen der EN-Normen 206 und 13813
- enthält Zement: Reagiert mit Feuchtigkeit alkalisch
- reizt die Haut, Gefahr ernster Augenschäden
- Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen
- Staub nicht einatmen
- bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser ausspülen und Arzt konsultieren
- Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen
- bei Verschlucken sofort ärztlichen Rat einholen und Verpackung oder Etikett vorzeigen

Bei den auszuführenden Arbeiten sind die einschlägigen Empfehlungen und Richtlinien, Normen und Regelwerke sowie mit geltende Merkblätter sowie die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu berücksichtigen. Auf unterschiedliche Witterungs-, Untergrund- und Objektbedingungen haben wir keinen Einfluss. Anwendungstechnische Empfehlungen in Wort und Schrift, die wir zur Unterstützung des Käufers bzw. Verarbeiters geben, sind unverbindlich und stellen kein vertragliches Rechtsverhältnis und keine kaufvertragliche Nebenverpflichtungen dar. Die in dem technischen Merkblatt gemachten Angaben und Empfehlungen beziehen sich auf den gewöhnlichen Verwendungszweck. Mit der Herausgabe dieses technischen Merkblattes verlieren alle vorangegangenen Ausgaben ihre Gültigkeit. Stand: März 2015

B.2 Eigenschaften des frischen Estrichs

Tabelle B.1: Ermittelte Frischmörteleigenschaften der Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Relative Luftfeuchte [%]	Probekörperdicke [mm]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Frischmörtelrohichte [kg/dm ³]
35_40	35 ± 5	40	5,2	2,190
35_60		60	4,7	2,201
35_80		80	5,5	2,240
50_50	50 ± 5	50	3,8	2,268
50_70		70	3,7	2,251
65_40	65 ± 5	40	6,6	2,093
65_60		60	4,7	2,224
65_80		80	5,6	2,198

B.3 Ermittelte Festigkeiten des Zementstrichs

Tabelle B.2: An Prismen ermittelte Druck- und Biegezugfestigkeiten der Versuchsreihen (nach DIN 13892).

Versuchsreihe	Prüftag		2	3	5	7	14	28
	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit						
35_40, 35_60 & 35_80	N/mm ²							
50_50 & 50_70	N/mm ²							
65_40, 65_60 & 65_80	N/mm ²							
Ø Druckfestigkeit:			13,27	18,12	21,64	23,45	29,13	33,17
Ø Biegezugfestigkeit:			2,01	3,41	4,82	5,11	6,00	7,01

Anhang C Ergebnisse der Untersuchung des Erhärtungsprozesses

C.1 Ergebnisse der einparametrischen Auswertung

Verlauf der Parameter für den Sensor R2P:

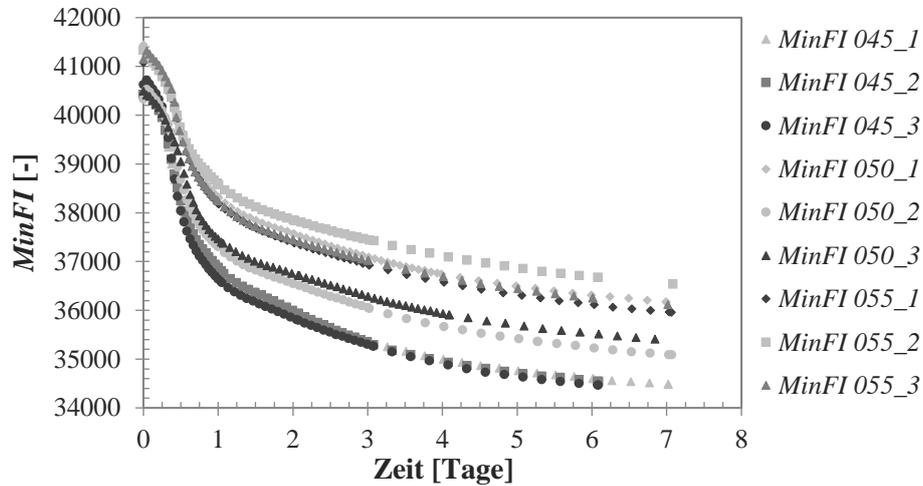


Abbildung C.1.1: Verlauf des Parameters $MinFI$ während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

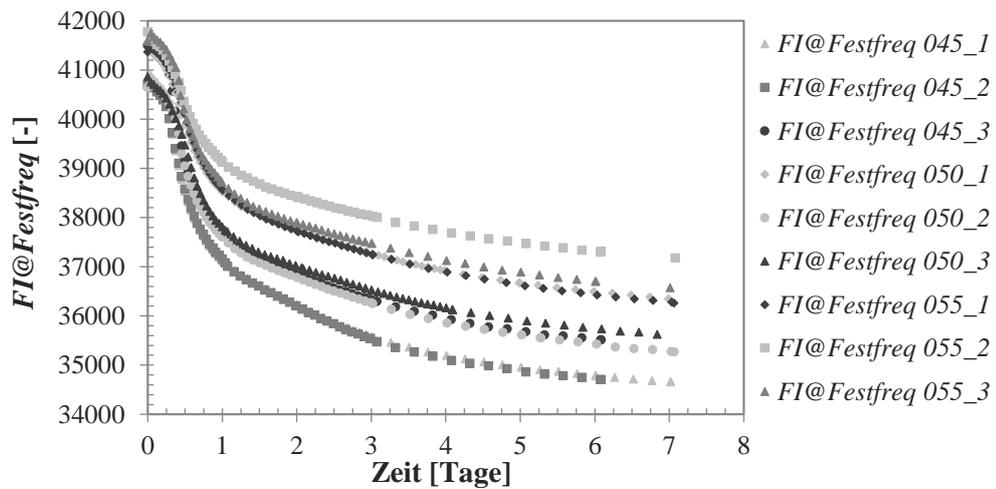


Abbildung C.1.2: Verlauf des Parameters $FI@Festfreq$ während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

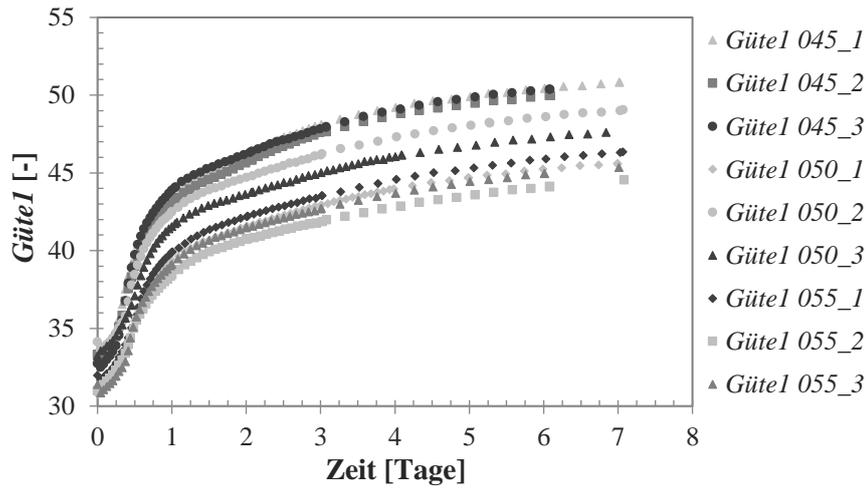


Abbildung C.1.3: Verlauf des Parameters *GüteI* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

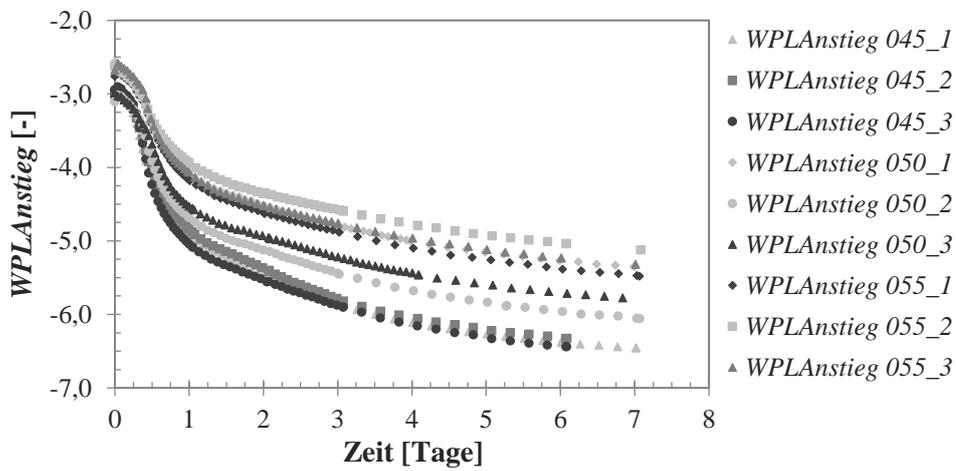


Abbildung C.1.4: Verlauf des Parameters *WPLAnstieg* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

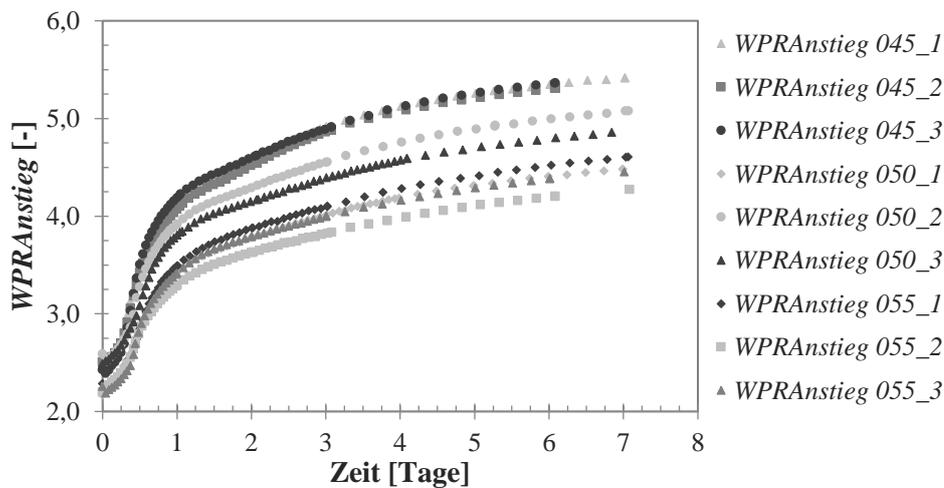


Abbildung C.1.5: Verlauf des Parameters *WPRAnstieg* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

Verlauf der Parameter für den Sensor PP:

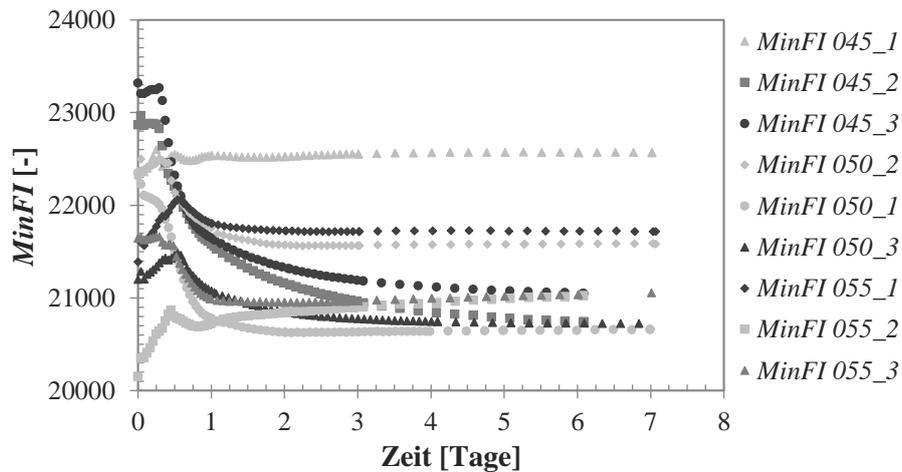


Abbildung C.1.6: Verlauf des Parameters *MinFI* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

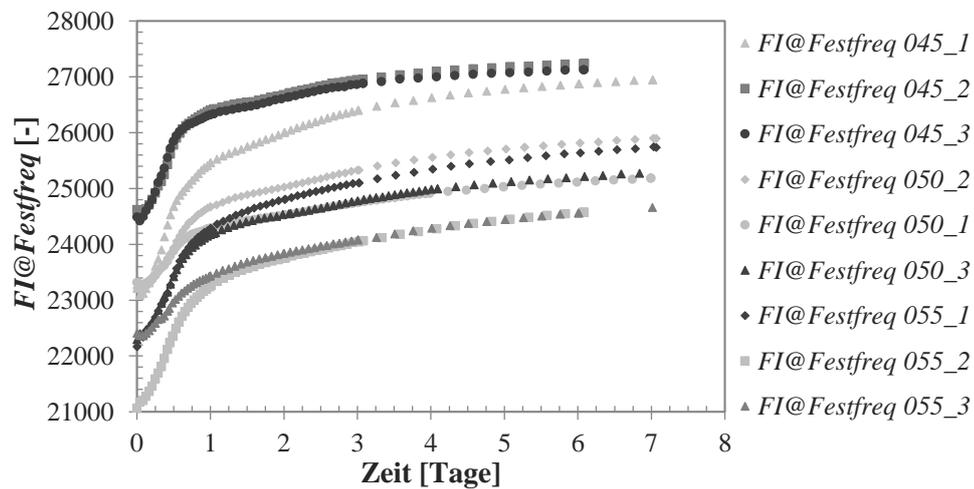


Abbildung C.1.7: Verlauf des Parameters *FI@Festfreq* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

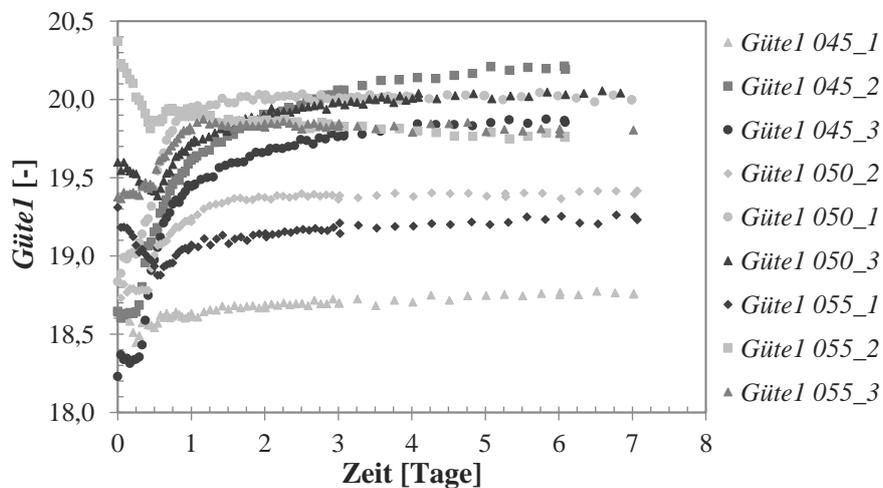


Abbildung C.1.8: Verlauf des Parameters *Güte1* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

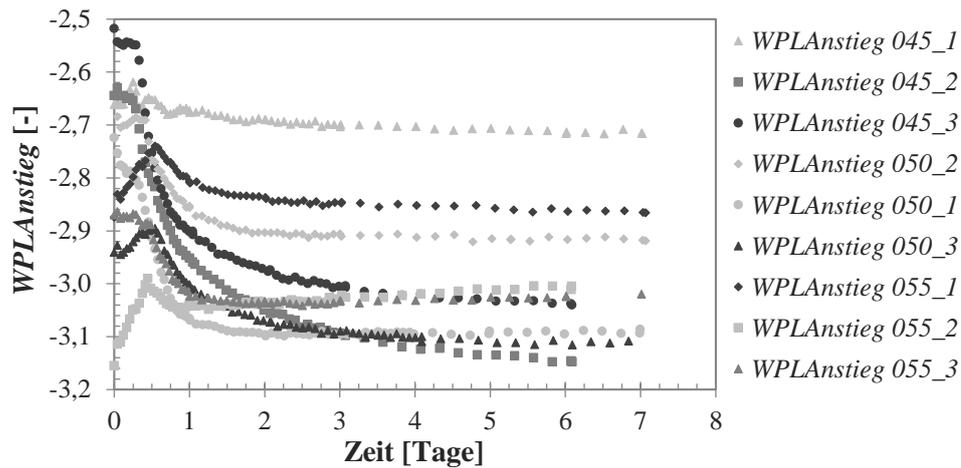


Abbildung C.1.9: Verlauf des Parameters *WPLAnstieg* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

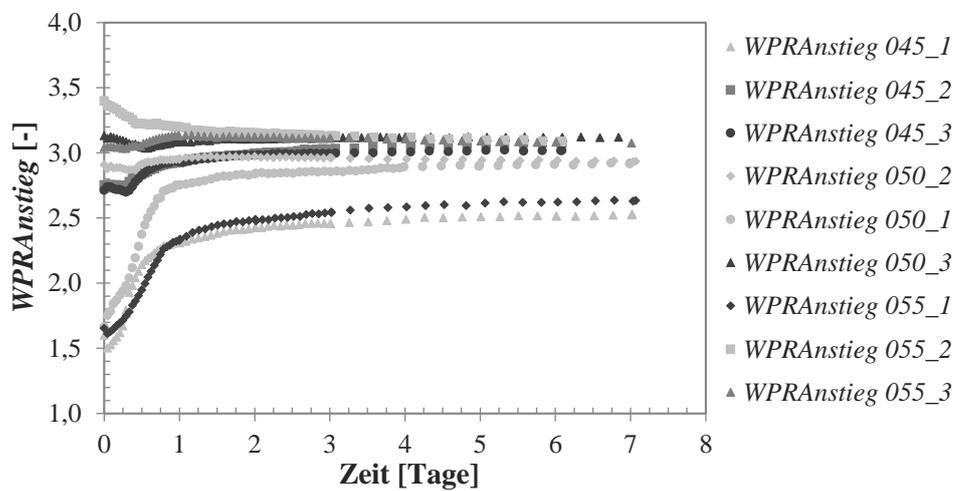


Abbildung C.1.10: Verlauf des Parameters *WPRAnstieg* während des Erhärtungsprozesses für w/z-Werte von 0,45; 0,50 und 0,55.

C.2 Ergebnisse der Multivariaten Datenanalyse (Sensor R2P)

Die Ergebnisse der Versuchsreihen mit w/z-Werten von 0,45 wurden bereits in Abschnitt 3.3.5 vorgestellt. Die Bezeichnung der Anwendungen der Versuchsreihen auf die Berechnungsmodelle entspricht:

Mikrowellenmessdaten_der_Versuchsreihe auf Modell_der_Versuchsreihe

Untersuchung der Parameter:

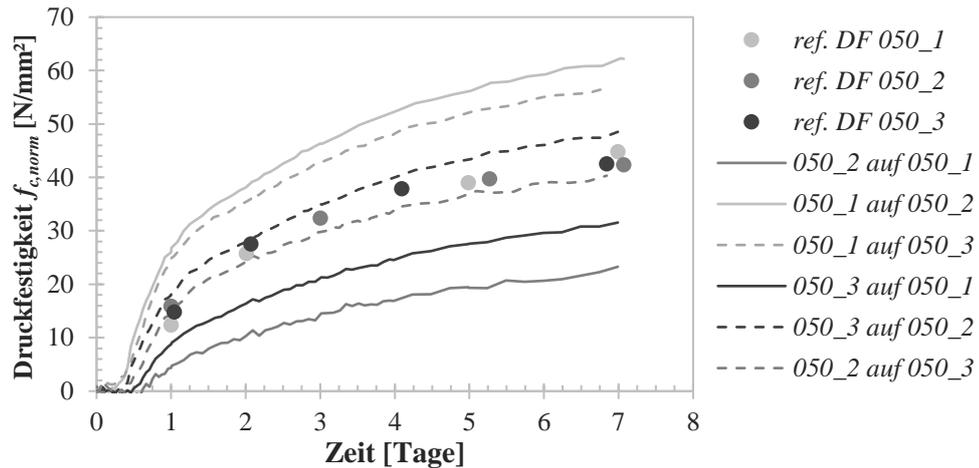


Abbildung C.2.1: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die MLR und w/z-Werten von 0,50.

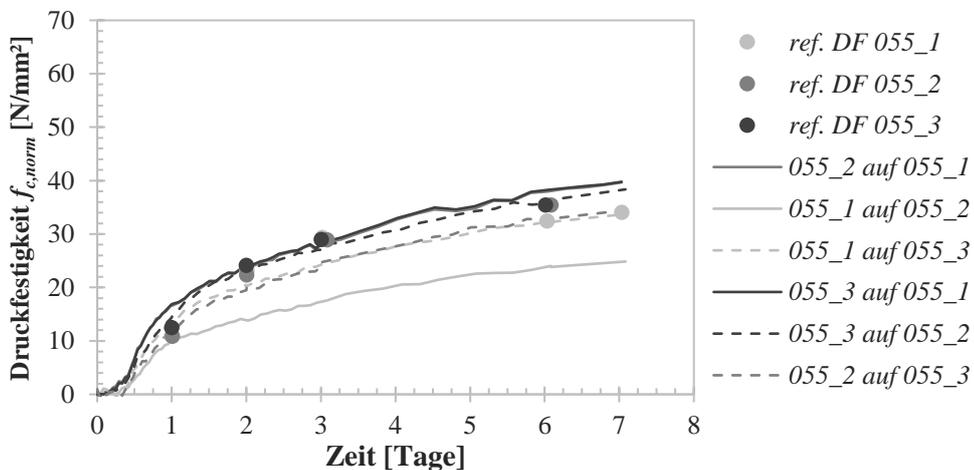


Abbildung C.2.2: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die MLR und w/z-Werten von 0,55.

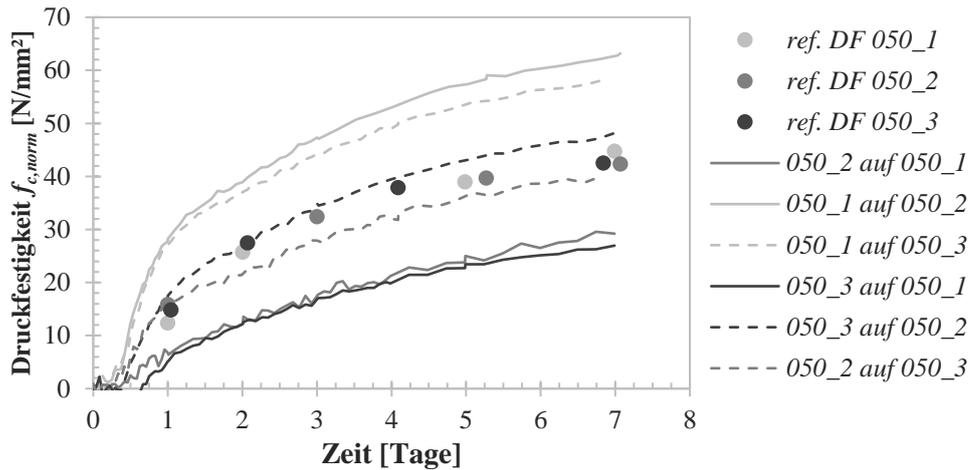


Abbildung C.2.3: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PCR und w/z-Werten von 0,50.

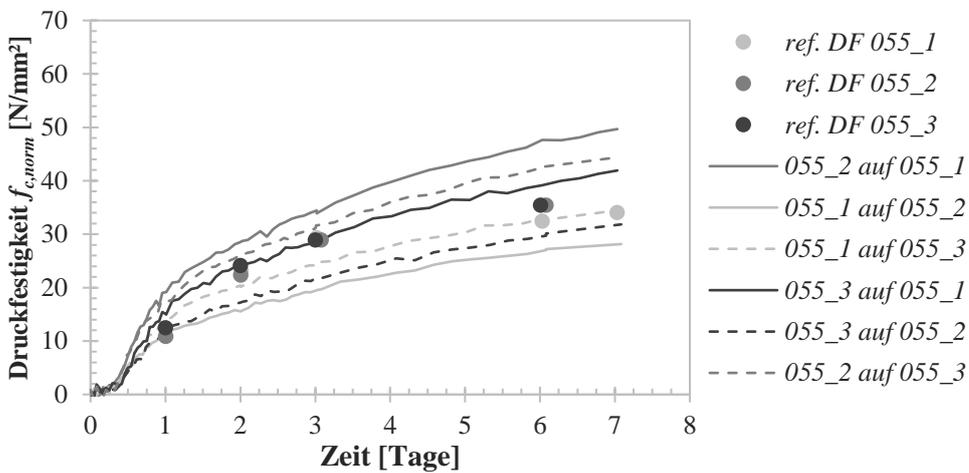


Abbildung C.2.4: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PCR und w/z-Werten von 0,55.

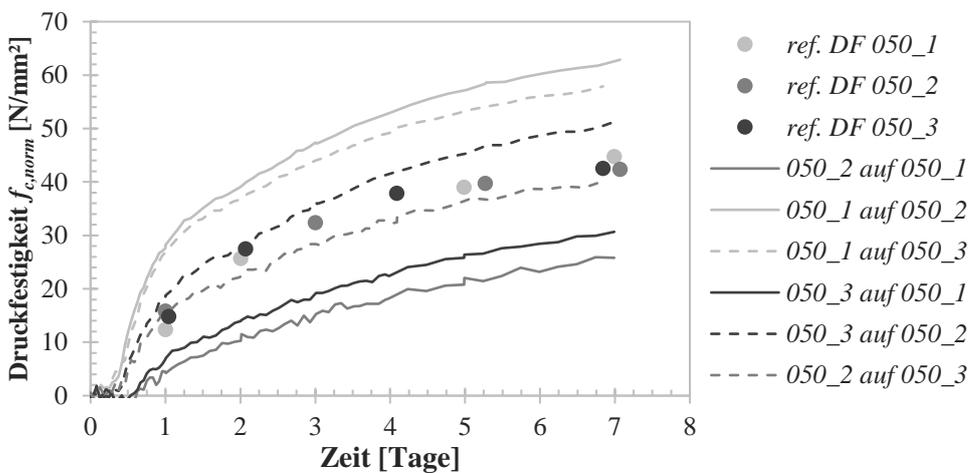


Abbildung C.2.5: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PLSR und w/z-Werten von 0,50.

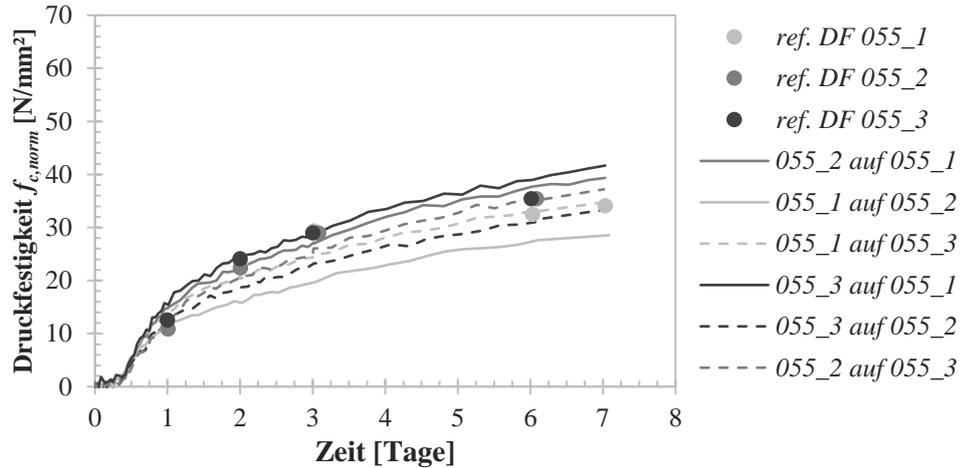


Abbildung C.2.6: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PLSR und w/z-Werten von 0,55.

Untersuchung der Verläufe der Feuchteindizes:

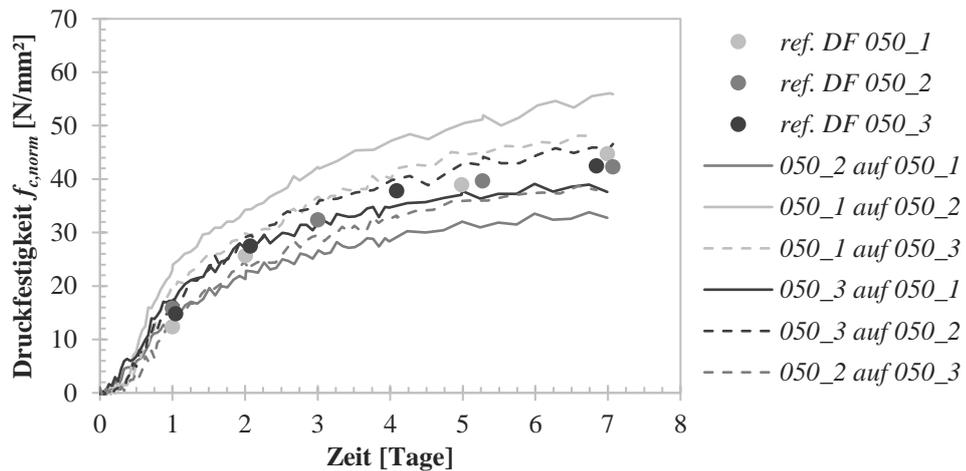


Abbildung C.2.7: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die MLR und w/z-Werten von 0,50.

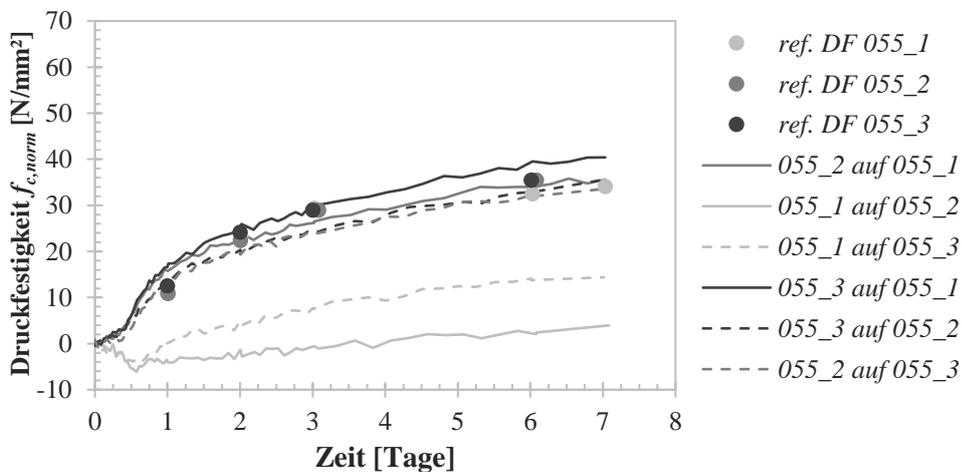


Abbildung C.2.8: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die MLR und w/z-Werten von 0,55.

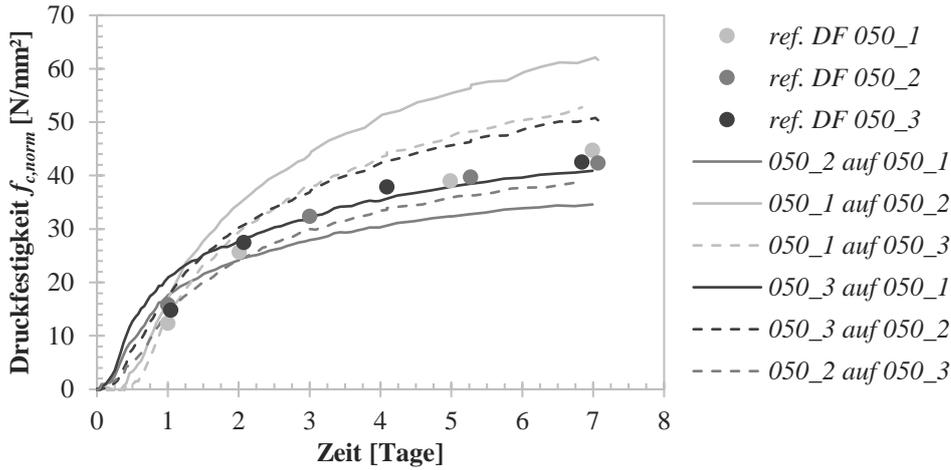


Abbildung C.2.9: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PCR und w/z-Werten von 0,50.

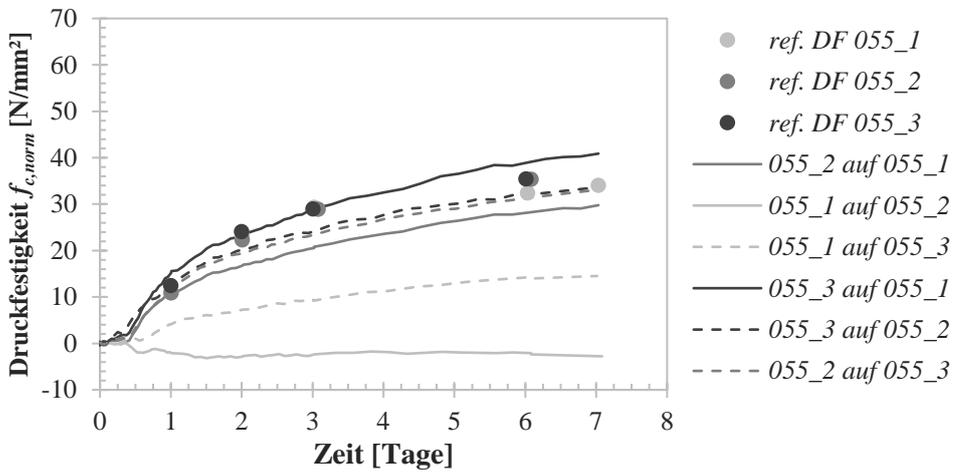


Abbildung C.2.10: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PCR und w/z-Werten von 0,55.

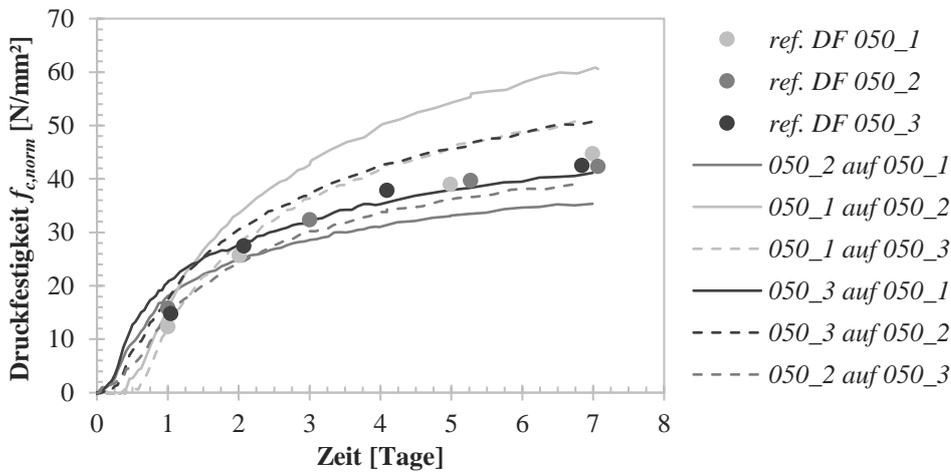


Abbildung C.2.11: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PLSR und w/z-Werten von 0,50.

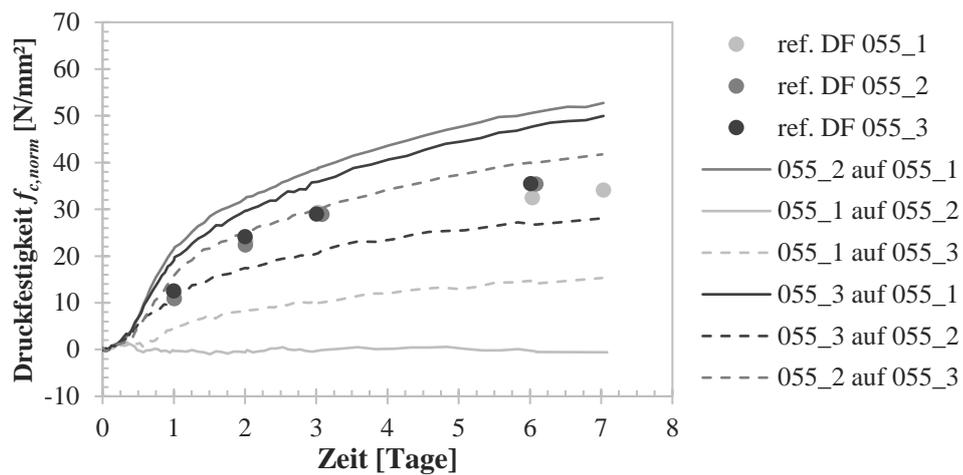


Abbildung C.2.12: Vergleich der berechneten mit den Referenzwerten für die PLSR und w/z-Werten von 0,55.

Anhang D Ergebnisse der Untersuchung des kombinierten Prozesses aus Erhärtung und Trocknung

Die Ergebnisse der Versuchsreihen 35_40, 35_60, 35_80 sowie 65_40, 65_60 und 65_80 wurden bereits in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt. Zur Vollständigkeit werden hier die Ergebnisse der Versuchsreihen 50_50 und 50_70 dargestellt und tabellarisch die ermittelten Feuchtegehalte aller Versuchsreihen aufgelistet.

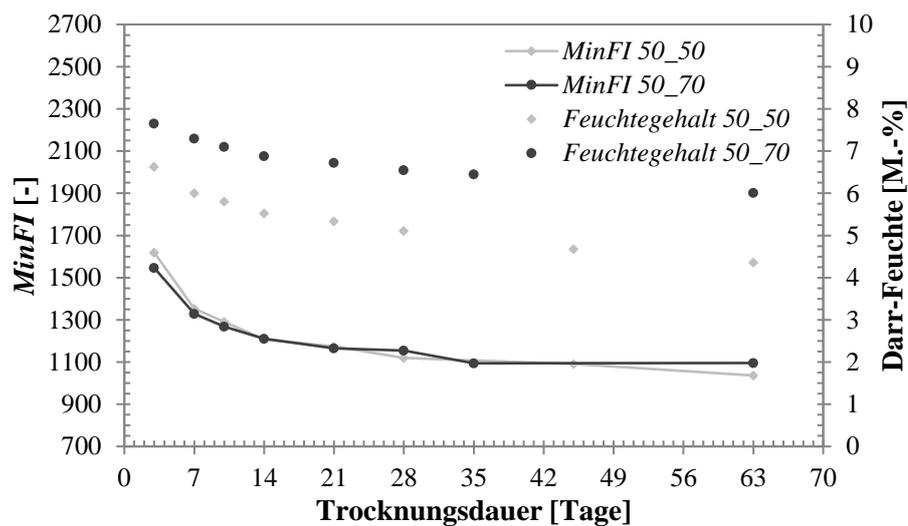


Abbildung D.1: Vergleich der Messwerte für klimatische Umgebungsbedingungen von $20 \pm 2 \text{ °C}$ / $50 \pm 5 \text{ % RH}$ und Probekörperdicken von 50 und 70 mm.

Tabelle D.1: Ermittelte Feuchteindizes und Feuchtegehalte der Versuchsreihen 35_40, 35_60 und 35_80.

Versuchsreihe	Prüftag	MinFI	Darr-Feuchte				CM-Feuchte
			integral	Gradient			
		[-]		[M.-%]	oben	Mitte	unten
35_40	1	2009	4,66	/	/	/	/
	2	1132	3,72	/	/	/	/
	3	997	3,54	/	/	/	/
	7	915	3,03	2,43	/	3,75	2,25
	14	862	2,64	1,74	/	2,31	2,75
	21	849	2,40	1,61	/	2,77	1,85
	28	873	2,24	0,99	/	2,63	1,55
	63	860	2,20	/	/	/	/
35_60	1	2180	7,14	/	/	/	/
	2	1468	6,01	/	/	/	/
	4	1058	5,57	/	/	/	/
	5	1046	5,44	/	/	/	/
	7	1002	5,26	2,93	5,61	6,12	3,50
	14	906	4,89	2,48	4,23	5,81	3,00
	21	920	4,62	2,95	3,05	5,12	2,25
	28	955	4,44	2,91	3,33	4,86	2,60
	35	905	4,31	2,48	3,58	4,61	2,90
	42	885	4,17	2,24	3,19	4,53	2,30
	63	879	3,94	2,06	3,25	4,38	2,00
35_80	1	2317	7,28	/	/	/	/
	2	1479	6,03	/	/	/	/
	3	1213	5,76	/	/	/	/
	6	1041	5,46	/	/	/	/
	7	1043	5,39	3,75	5,37	5,52	4,50
	14	941	4,96	4,03	4,61	5,04	3,60
	21	945	4,68	3,22	4,91	4,92	3,25
	28	930	4,50	2,75	4,33	4,82	3,00
	35	918	4,31	2,38	4,08	4,68	3,15
	42	908	4,16	2,48	3,61	4,44	3,25
	63	930	3,86	2,34	3,64	4,22	2,05

Tabelle D.2: Ermittelte Feuchteindizes und Feuchtegehalte der Versuchsreihen 50_50 und 50_70.

Versuchsreihe	Prüftag	<i>MinFI</i>	Darr-Feuchte				CM-Feuchte
			integral	Gradient			
				oben	Mitte	unten	
		[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[CM-%]
50_50	1	2223	7,11	/	/	/	/
	3	1619	6,63	/	/	/	/
	7	1354	6,00	5,55	/	6,21	5,60
	10	1291	5,81	5,44	/	6,09	5,30
	14	1207	5,53	4,95	/	5,99	4,65
	21	1175	5,34	4,77	/	5,55	5,15
	28	1120	5,11	4,44	/	5,12	4,35
	45	1091	4,68	4,31	/	4,99	4,00
	63	1037	4,36	3,99	/	4,68	3,80
50_70	1	2286	7,70	/	/	/	/
	3	1546	7,65	/	/	/	/
	7	1329	7,30	5,89	6,95	7,66	5,75
	10	1268	7,10	5,77	6,90	7,33	5,50
	14	1210	6,88	5,58	6,88	7,22	5,60
	21	1166	6,72	5,33	6,58	7,11	6,00
	28	1155	6,55	5,09	6,43	6,89	5,00
	35	1094	6,45	5,02	6,40	6,82	4,70
	63	1095	6,01	4,88	6,22	6,85	4,90

Tabelle D.3: Ermittelte Feuchteindizes und Feuchtegehalte der Versuchsreihen 65_40, 65_60 und 65_80.

Versuchsreihe	Prüftag	MinFI	Darr-Feuchte				CM-Feuchte
			integral	Gradient			
		[-]		[M.-%]	oben	Mitte	unten
65_40	1	2276	6,70	/	/	/	/
	2	1831	5,43	/	/	/	/
	3	1542	4,86	/	/	/	/
	5	1422	4,43	/	/	/	/
	7	1232	4,21	4,35	/	5,57	4,15
	14	1174	3,85	3,65	/	4,04	3,50
	21	1068	3,66	3,46	/	3,83	2,75
	28	1091	3,55	2,98	/	3,83	2,50
	35	1074	3,47	2,48	/	3,77	2,50
	42	1060	3,42	3,10	/	4,00	2,75
	63	1071	3,34	2,66	/	3,75	2,25
65_60	1	2380	7,12	/	/	/	/
	2	2012	6,16	/	/	/	/
	3	1661	5,73	/	/	/	/
	6	1465	5,30	/	/	/	/
	7	1406	5,22	5,55	6,27	7,16	4,00
	14	1276	4,89	4,47	4,59	5,61	4,25
	21	1197	4,73	3,88	4,93	5,85	3,75
	28	1200	4,61	2,44	5,07	5,23	2,25
	35	1211	4,52	2,91	4,62	4,92	2,85
	42	1174	4,46	2,42	4,18	4,93	2,65
	63	1189	4,34	2,63	4,08	4,84	3,00
65_80	1	2351	7,71	/	/	/	/
	2	2085	6,91	/	/	/	/
	4	1602	6,22	/	/	/	/
	5	1507	6,09	/	/	/	/
	7	1393	5,90	5,18	6,05	6,29	6,00
	14	1264	5,60	5,02	6,24	6,32	4,75
	21	1252	5,42	4,60	6,18	6,37	4,25
	28	1259	5,30	4,49	5,92	5,86	4,50
	35	1217	5,21	3,03	4,87	5,80	4,50
	42	1253	5,13	3,46	5,38	5,55	4,00
	63	1179	4,99	3,29	4,91	5,21	3,35

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich André Dollase, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.