

**Berechnungsmodell zur Bestimmung von
Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeß-
werten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in
der Betonrandzone mittels Einbausensoren**

T 2790

T 2790

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-5416-3

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

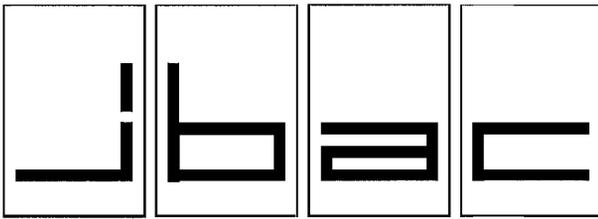
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

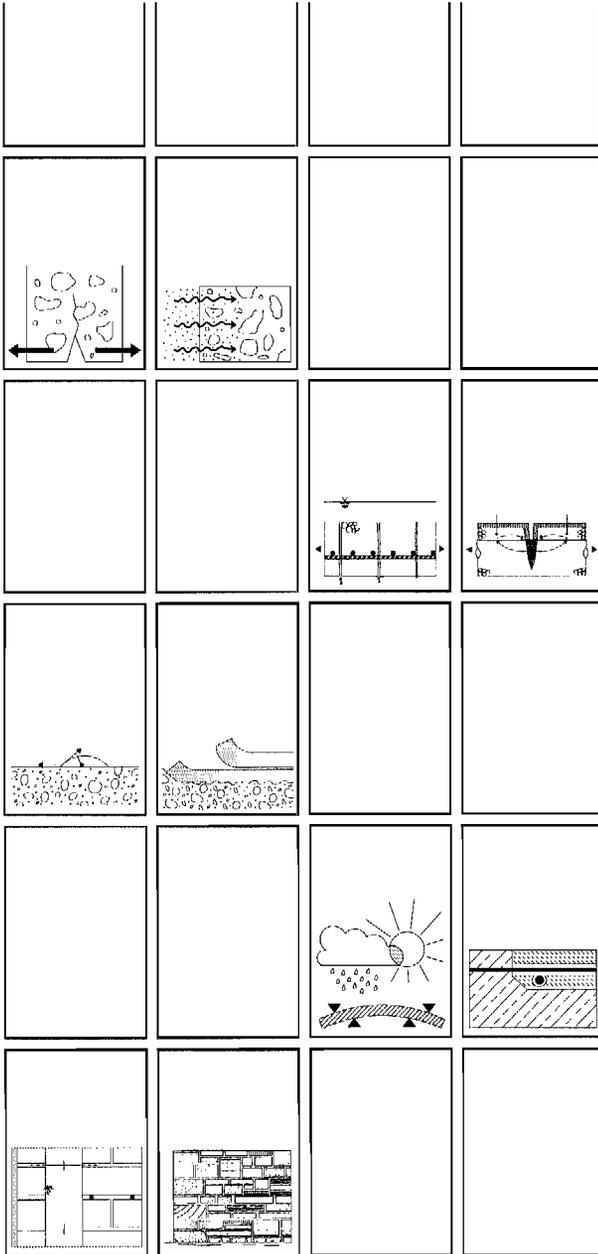
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>



Institut für Bauforschung Aachen
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



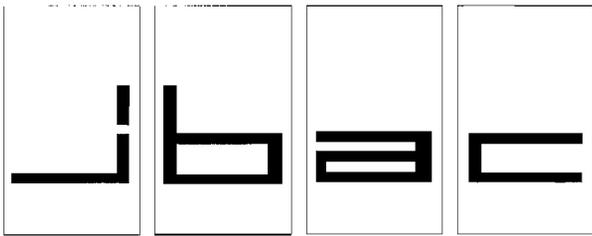
Forschungsbericht

F 538

Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren

Baustoff · Bauteil · Bauwerk

Forschung · Entwicklung
Überwachung
Prüfung · Beratung



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Postfach, D-52056 Aachen

Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-51 00 · Telex 8 32 704 thac d · Telefax (02 41) 88 88-139

Bre/Fk

1. Ausfertigung

THEMA

Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 538

vom 24.10.1997

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. T. Souchon

Dipl.-Ing. W. Breit

Auftraggeber/
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30

10829 Berlin

Auftragsdatum

27.06.1996

Aktenzeichen

IV 1-5-799/96

Dieser Bericht umfaßt 51 Seiten, davon 51 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens	2
1.3	Arbeitsplan	2
2	MESSVERFAHREN	3
2.1	Multi-Ring-Elektrode.....	3
2.2	Meßprinzip	6
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	7
3.1	Prüfkörper	7
3.2	Umgebungsbedingungen.....	10
3.3	Versuchsbeschreibung.....	11
3.4	Versuchsauswertung	12
4	KALIBRIERUNG.....	13
4.1	Einführung in die Problemstellung	13
4.2	Einfluß des Betonalters (Hydratationsgrad).....	14
4.3	Funktionaler Zusammenhang zwischen tiefenabhängigem Elektrolytwiderstand des Betons und der Umgebungsfeuchte.....	15
4.3.1	Herleitung des funktionalen Zusammenhangs für Portlandzementbeton	15
4.3.2	Erweiterung des funktionalen Zusammenhangs auf Hochofenzementbeton .	21
4.3.3	Erweiterung des funktionalen Zusammenhangs auf Flugaschezementbeton.	23
4.4	Einfluß der Mischungszusammensetzung.....	25
4.5	Zusammenfassung.....	29

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
5	BERECHNUNGSMODELL ZUR BESTIMMUNG DER FEUCHTE- VERTEILUNG	29
5.1	Berechnungsansatz.....	29
5.2	Bestimmung der Feuchteverteilung - Beispiele	30
5.2.1	Beispiel 1.....	30
5.2.2	Beispiel 2.....	33
5.3	Programm zur Berechnung der Feuchteverteilung	36
5.3.1	Allgemeines.....	36
5.3.2	Input	36
5.3.3	Berechnungsalgorithmus.....	37
5.3.4	Output.....	39
5.3.5	Programm	40
5.3.5.1	Hauptprogramm	40
5.3.5.2	45
5.3.5.2	Iterationsprogramm nach Newton-Verfahren	45
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	46
7	LITERATUR.....	48

1 EINFÜHRUNG

1.1 Problemstellung

Feuchteverteilungen in Betonbauwerken sind für viele bautechnologische Probleme von Interesse, da eine Reihe von wichtigen Materialeigenschaften, insbesondere deren Beständigkeit, feuchteabhängig sind. So werden unter anderem die Korrosionsgeschwindigkeit des Stahles in Beton, der Frostwiderstand und der Widerstand des Betons gegen aggressive Stoffe, wie zum Beispiel Sulfate, sowie die Geschwindigkeit der Alkali-Silika-Reaktion entscheidend von der Betonfeuchtigkeit beeinflusst. Insbesondere auch zur Beurteilung der Wirksamkeit von Beschichtungen auf der Betonoberfläche hinsichtlich ihrer Fähigkeit ein Eindringen von Wasser in den Beton zu verhindern, ist es notwendig, den Wassergehalt des Betons und besonders die Verteilung des Wassergehaltes in der Betonrandzone messen zu können.

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes in der Betonrandzone wurde am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, ibac, eine sogenannte Multi-Ring-Elektrode /1 bis 6/ entwickelt, die sowohl in neue Bauteile als auch in Bohrlöcher an bestehenden Bauwerken eingebaut werden kann.

Dieser Sensor wurde bereits im vorangegangenen Forschungsvorhaben „Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren“ - F 389 (Aktenzeichen IV 1-5-582/89) /1/ eingesetzt. Neben umfangreichen Grundlagenuntersuchungen zum zeit- und tiefenabhängigen Verlauf des elektrolytischen Widerstandes von Beton in Abhängigkeit von den wesentlichen betontechnischen Einflußgrößen, wurde im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens ein baustellentaugliches Verfahren für den nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektrode in bestehende Bauwerke konzipiert. Es wurde gezeigt, daß Multi-Ring-Elektroden sowohl für wissenschaftliche Untersuchungen als auch für die Überwachung bestehender Bauwerke geeignet sind.

Anhand der mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen zeit- und tiefenabhängigen Widerstandsprofile von Betonen können zwar eindeutig Feuchtigkeitsänderungen erfaßt werden, bisher ist es jedoch nur möglich qualitative Aussagen zum Beispiel über den Feuchtegehalt des Betons zu treffen. Gelingt es, durch Kalibrierung des Meßverfahrens den Widerständen entsprechende Betonfeuchtigkeitsgehalte zu zuordnen, so könnte dann beispielsweise die Korrosionsgefahr auch quantitativ beurteilt werden.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, das Meßverfahren mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden so zu kalibrieren, daß den mit diesem Sensor gemessenen zeit- und tiefenabhängigen Widerständen unmittelbar Betonfeuchtigkeitsgehalte zugeordnet werden können. Unter Ausnutzung bekannter Ansätze zur Bestimmung der Feuchteverteilung soll ein geeignetes Berechnungsmodell erstellt und in ein computertaugliches Programm umgesetzt werden.

Zur Durchführung dieses Forschungsvorhabens wurde der im folgenden Abschnitt erläuterte Arbeitsplan aufgestellt.

1.3 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan des Forschungsvorhabens läßt sich in vier wesentliche Arbeitsschwerpunkte gliedern:

1. **Wiederaufnahme der Messungen an den vorhandenen Prüfkörpern** des vorangegangenen Forschungsvorhabens „Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren“ - F 389 (Aktenzeichen IV 1-5-582/89) /1/.

Zunächst muß die Funktionsfähigkeit der in den Prüfkörpern eingebauten Multi-Ring-Elektroden überprüft werden. Anschließend werden die Prüfkörper in die vorgesehenen Klimaräume eingelagert. Die Widerstandsmessungen werden über einen Zeitraum von etwa 6 Monaten einmal pro Woche durchgeführt und zur computergeeigneten Auswertung vorbereitet.

2. **Kalibrierung der Multi-Ring-Elektrode** in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte, der Zementart und dem Wasserzementwert.

Mit Hilfe von Regressionsrechnungen werden Gleichungen zur Beschreibung der jeweiligen Einflußgröße abgeleitet.

3. **Entwicklung eines Berechnungsmodells** zur Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone.
4. Umsetzung des Berechnungsmodells in ein **computergeeignetes Programm**; mit Eingabemaske, Berechnungsalgorithmus und Ausgabe des Ergebnisses in tabellarischer und grafischer Form.

Da sich die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen ausschließlich auf Meßwerte von Multi-Ring-Elektroden stützen, wird im folgenden zunächst der Aufbau und die Funktionsweise dieses Sensors sowie das zugrundeliegende Meßprinzip beschrieben. Bezüglich der bereits durchgeführten Grundlagenuntersuchungen, in denen beispielsweise der Einfluß von betontechnischen Parametern auf den Elektrolytwiderstand von Beton beschrieben wurde, wird auf das vorangegangene Forschungsvorhaben /1/ verwiesen.

2 MESSVERFAHREN

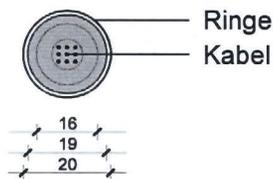
2.1 Multi-Ring-Elektrode

Die Multi-Ring-Elektrode (s. Bilder 1 und 2) besteht aus abwechselnd übereinanderliegenden Edelmetall- und Isolierringen. Sie wurde als Steckbauweise konzipiert, damit die Anzahl der Ringe beliebig variiert werden kann. Die hinsichtlich der Geometrie optimierte Version des Sensors hat einen Außendurchmesser von 20 mm und besteht in der Regel aus neun Edelmetallringen, so daß ein Meßprofil von acht Meßpunkten erzielt wird. Bei einer Ringdicke von 2,5 mm wird so ein Tiefenprofil von ca. 50 mm mit Meßwerten im Abstand von 5 mm erfaßt. Der elektrische Anschluß der Ringe erfolgt durch Kabel, die im Inneren der Elektrode geführt werden, so daß durch die Kabelführung keine Beeinflussung des umgebenden Betons (Meßbereich) entsteht. Die verbleibenden Hohlräume werden mit elektrisch nicht leitendem Epoxidharz verfüllt.

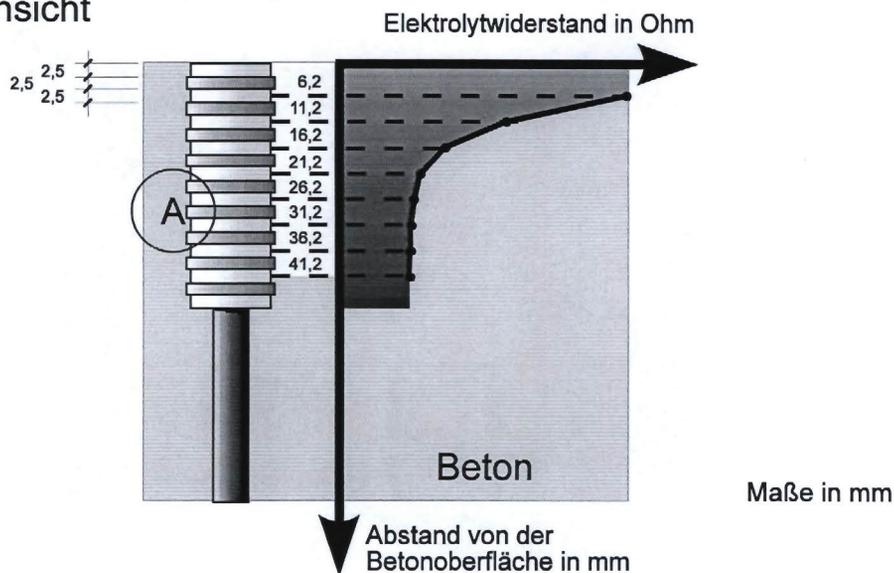
Zwischen jeweils zwei benachbarten Edelmetallringen können nun von außen die elektrolytischen Widerstände des Betons mit einem geeigneten Meßgerät bestimmt werden. Grundsätzlich kann der elektrische Widerstand von Beton mit Gleich- oder Wechselstrommessungen bestimmt werden. Die Ermittlung des elektrischen Widerstandes mittels Wechselstrommessung ist jedoch der Gleichstrommessung vorzuziehen, da in diesem Fall Polarisierungseffekte, wie sie bei Anlegen einer Gleichspannung auftreten, ausgeschaltet werden. Die beweglichen Ionen zwischen den Meßelektroden werden in Schwingung versetzt, ohne daß es zu einer chemischen Reaktion bzw. Polarisation an der Metalloberfläche kommt. Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Wechselstromfrequenzen auf den Widerstand von Beton haben gezeigt, daß für die Messungen Frequenzen zwischen 50 Hz und 1 kHz geeignet sind /7 bis 9/.

Ein speziell für die Messung der Multi-Ring-Elektrode geeignetes Gerät wurde im ibac entwickelt. Das diesem Handmeßgerät zugrundeliegende Meßprinzip wird in Abschnitt 2.2 erläutert. Um die Widerstände auch kontinuierlich und automatisch erfassen zu können, steht alternativ die Möglichkeit der computergesteuerten Datenerfassung und Auswertung zur Verfügung.

Draufsicht



Seitenansicht



Detail A

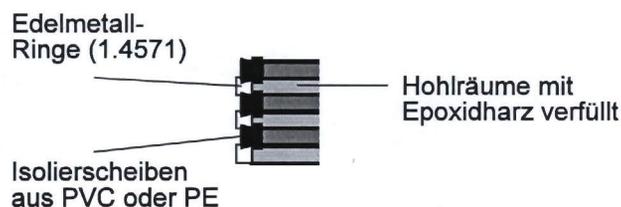


Bild 1: Schematische Darstellung der Multi-Ring-Elektrode und qualitative Darstellung der Meßwerte

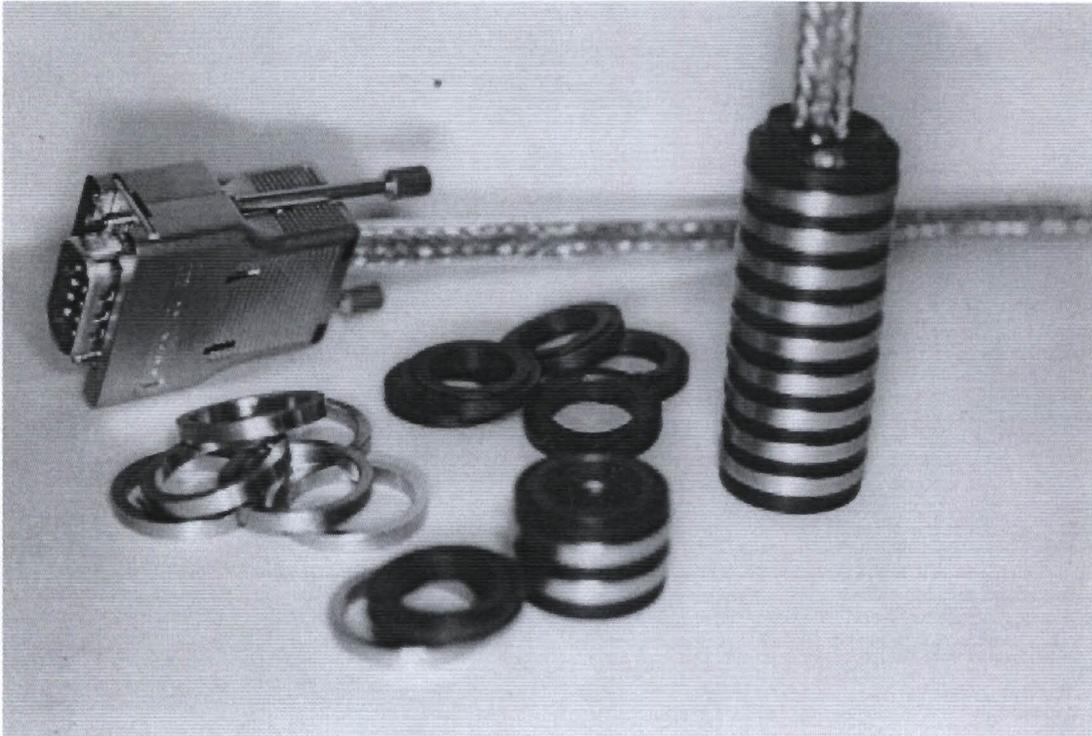


Bild 2: Multi-Ring-Elektrode

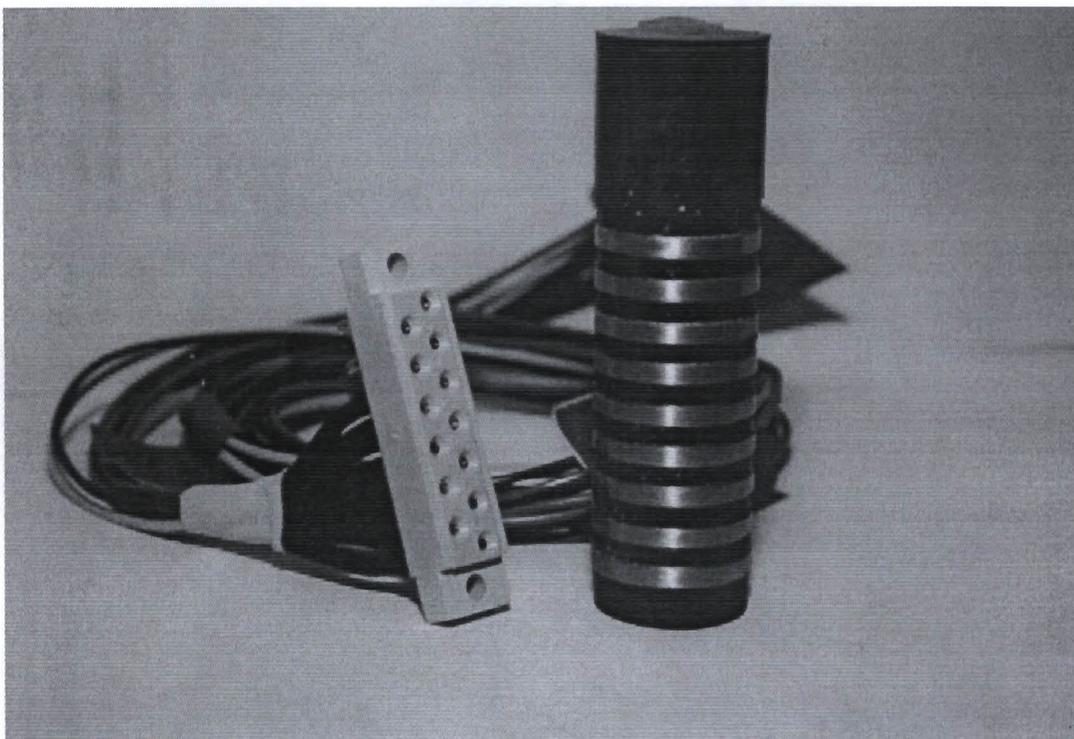


Bild 3: Multi-Ring-Elektrode (alte Version)

Da die in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen an den vorhandenen Prüfkörpern des vorangegangenen Forschungsvorhabens /1/ durchgeführt wurden, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß es sich um Multi-Ring-Elektroden älterer Bauweise handelt (siehe Bild 3). Die Herstellung dieser Elektroden - ausführlich beschrieben in /1/ - wurde zwar nach einem anderen Verfahren durchgeführt, hatte aber erwartungsgemäß keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Das bedeutet, daß die Ergebnisse erzielt mit Multi-Ring-Elektroden alter bzw. neuer Bauweise direkt vergleichbar sind.

2.2 Meßprinzip

Das Meßprinzip, das im Rahmen dieser Untersuchungen zur Erfassung von Elektrolytwiderständen angewandt wurde, ist in Bild 4 schematisch dargestellt.

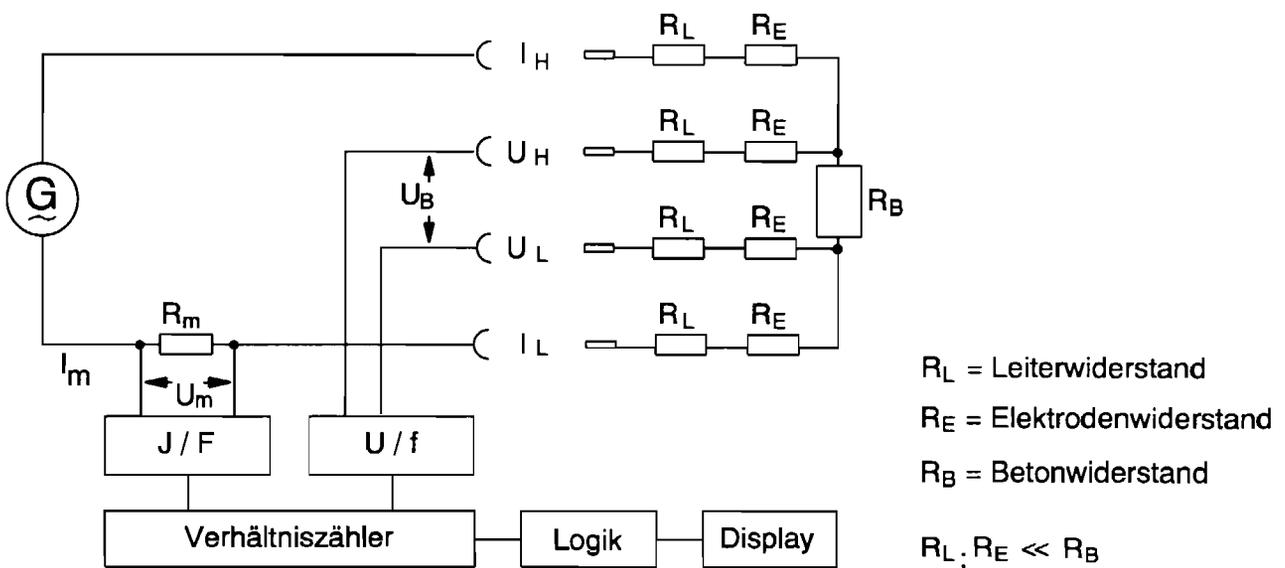


Bild 4: Meßprinzip

Aus dem Generator G fließt ein sinusförmiger Wechselstrom I_m (max. 10 mA) mit einer Meßfrequenz von $f = 108$ Hz über zwei Elektroden an den Punkten I_H und I_L in den Beton; der Stromkreis ist geschlossen. Die angelegte Meßspannung beträgt dabei maximal 1 V. Die Leiter- und Elektrodenwiderstände (R_L und R_E) sind gegenüber dem Betonwiderstand R_B so gering, daß sie vernachlässigt werden können.

Der Meßstrom ruft in einem Abschnitt des Stromkreises (zwischen den Punkten U_H und U_L) den Spannungsabfall U_B hervor, der über zwei Kontakte an den Punkten U_H und U_L gemessen werden kann. Die Wechselspannung wird gleichgerichtet und mit einem Spannungsfrequenz-Wandler in eine zu dieser Wechselspannung proportionale Frequenz umgewandelt. Der den Stromkreis durchfließende Wechselstrom wird indirekt über den Widerstand R_m von 100Ω bzw. $10 \text{ k}\Omega$ gemessen (OHM'sches Gesetz: $U = R \cdot I$) und nach Gleichrichtung über einen Strom-Frequenz-Wandler ebenfalls in eine Frequenz umgesetzt. Das Verhältnis der Impulse in einem definierten Zeitintervall wird über einen Verhältnisähler (Quotientenmesser) bestimmt und so die beiden Signale miteinander verknüpft. Das verbleibende Signal wird in der Logik weiterverarbeitet. Das Meßergebnis und die Dimension (Ω , $\text{k}\Omega$) werden auf einem Display angezeigt. Die obere Grenze des Meßbereiches liegt bei $200 \text{ k}\Omega$.

Zur Erfassung der Widerstände unmittelbar zwischen zwei Elektroden können jeweils die Punkte I_H und U_H sowie I_L und U_L gebrückt werden. Dieses Meßprinzip findet auch bei der Multi-Ring-Elektrode Anwendung.

3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

3.1 Prüfkörper

Zur Durchführung der Untersuchungen konnte auf die inzwischen vier Jahre alten Prüfkörper zurückgegriffen werden, die im vorangegangenen Forschungsvorhaben „Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren“ - F 389 (Aktenzeichen IV 1-5-582/89) /1/ hergestellt wurden. Das für Laboruntersuchungen vergleichsweise hohe Alter der Prüfkörper gewährleistet, daß die Hydratationsprozesse als weitgehend abgeschlossen betrachtet werden können.

Die Prüfkörper haben die Maße $b \times d \times h = 350 \times 270 \times 230 \text{ mm}^3$. Als Schalung dienten bei der Herstellung Kunststoffbehälter, in denen die Prüfkörper auch nach dem Erstarren verblieben und gelagert wurden. Auf diese Weise ist eine Wasserabgabe nur über eine definierte Fläche von $270 \times 350 \text{ mm}^2$, die simulierte Bauteiloberfläche, möglich. Je Prüfkörper wurde eine Multi-Ring-Elektrode zentrisch an der unversiegelten Oberfläche angeordnet und direkt mit einbetoniert (Bild 5).

Zur Erfassung betontechnischer Einflußgrößen wurden für diese Untersuchungen 10 Prüfkörper ausgewählt, die sich hinsichtlich der Zementart und des Zementgehaltes sowie des Wasserzementwertes unterschieden

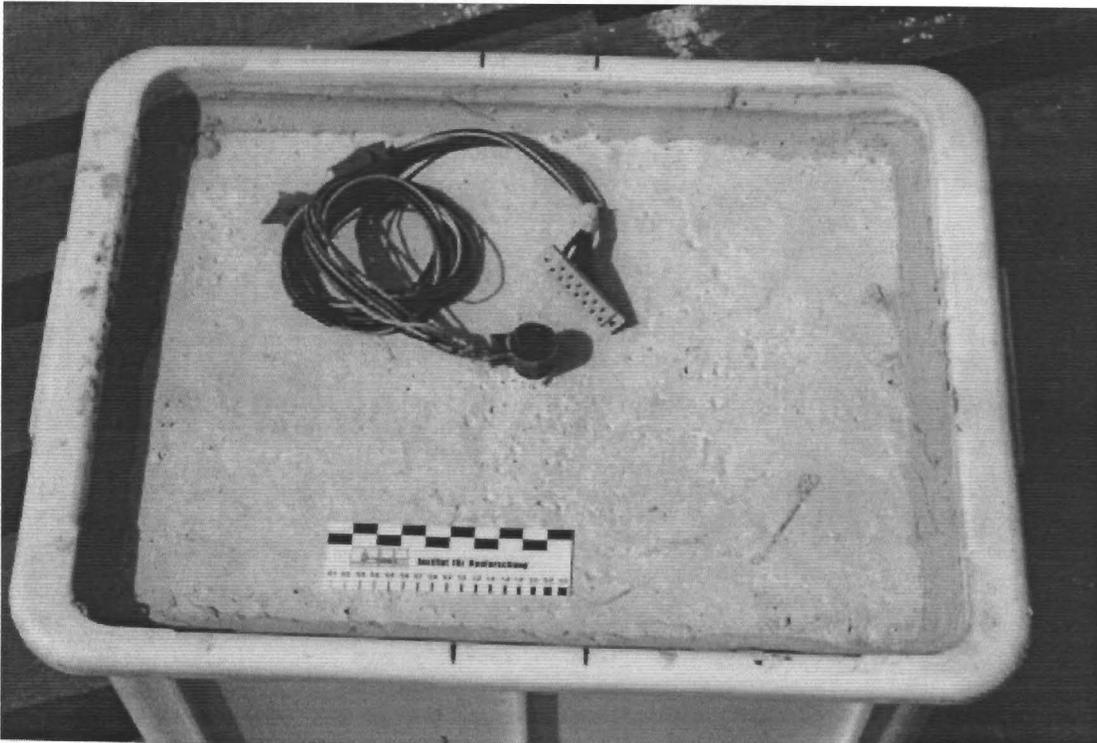


Bild 5: Prüfkörper mit einbetonierter Multi-Ring-Elektrode

Die Betonzusammensetzung kann der Tabelle 1 entnommen werden. Die chemische Zusammensetzung und Hauptbestandteile der verwendeten Zemente geht aus Tabelle 2 hervor. Mit Ausnahme der Prüfkörper Nr. 15, 25 und 31 entspricht der Zementgehalt den Mindestanforderungen für Außenbauteile nach DIN 1045 von $\geq 300 \text{ kg/m}^3$ bei einem Wasserzementwert $\leq 0,6$. Als Zuschlag wurde Rheinkies und Rheinsand mit der Sieblinie B 16 nach DIN 1045 verwendet. Die Betone wurden nach dem Einbringen auf einem Rütteltisch verdichtet und anschließend zwei Tage lang im Feuchteraum nachbehandelt. Anschließend wurden die Prüfkörper in Klimäräumen bei einer Temperatur von $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $75 \pm 5 \%$ gelagert und dort später verschiedenen Wasserbeaufschlagungszyklen unterzogen (s. /1/).

Die für die Untersuchungen ausgewählten Prüfkörper lagerten nach Abschluß des vorangegangenen Forschungsvorhabens /1/ in einem Klimaraum mit einer Temperatur von $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $70 \pm 5 \%$. Zu Beginn dieses Forschungsvorhabens (Juli 1996) wiesen die Prüfkörper bereits ein Alter von vier Jahren auf.

Tabelle 1: Versuchsp Parameter

Prüfkörper Nr. (vergleiche /1/)	Zementart	Zement- gehalt	Wasser- zementwert
-	-	kg/m ³	-
1	2	3	4
1	PZ 35F	330	0,5
6, 7		300	0,6
15		260	0,7
22, 23	HOZ 35L	300	0,6
25		260	0,7
28, 29	FAZ 35L	300	0,6
31		260	0,7

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung und Hauptbestandteile der verwendeten Zemente

Bestandteil	PZ 35F (CEM I 32,5 R)	HOZ 35L (CEM III/A 32,5)	FAZ 35L (CEM II/B-V 32,5)
-	Anteil in M.-%		
1	2	3	4
SiO ₂	20,85	25,58	26,49
Al ₂ O ₃	6,05	7,54	9,47
Fe ₂ O ₃	3,07	2,40	4,13
CaO	63,93	56,66	54,67
SO ₃	3,41	4,17	3,08
MgO	1,19	3,54	1,87
K ₂ O	0,80	0,74	1,17
Klinker	100	58	74
Hüttensand	-	42	-
Flugasche	-	-	26

3.2 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsfeuchte bestimmt die Feuchtigkeitsabgabe und -aufnahme des Betons. Davon sind bei kurzfristigen Änderungen der Umgebungsfeuchtigkeit in erster Linie die oberflächennahen Schichten des Betons betroffen, während der Bereich der sogenannten Kernfeuchte davon nahezu unberücksichtigt bleibt. Lediglich lang andauernde Änderungen der Umgebungsfeuchte führen auch zu Veränderungen des Wassergehaltes im Bereich der Kernfeuchte. Prinzipiell kann festgehalten werden, daß der Einfluß der Umgebungsfeuchte auf den Elektrolytwiderstand des Betons mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche abnimmt.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde bei einer konstanten Temperatur von $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ die relative Luftfeuchtigkeit zu 70, 80 und 100 % variiert und die tiefenabhängigen Elektrolytwiderstände für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte bestimmt.

*Die **Gleichgewichtsfeuchte** eines Prüfkörpers wurde im Rahmen dieser Untersuchungen als der Zustand definiert, in dem mit der Multi-Ring-Elektrode keine Widerstandsänderungen mehr gemessen werden konnten.*

Die Klimadaten wurden während der Lagerung im Prüfklima kontinuierlich aufgezeichnet, um auftretende Klimaschwankungen erkennen und bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen zu können.

Auf eine Variation der Temperatur wurde verzichtet, da der Einfluß der Temperatur durch die folgende Gleichung berücksichtigt werden kann:

$$R_{el} = R_{el,0} \cdot e^{b \cdot (1/T - 1/T_0)} \quad (1)$$

mit R_{el} = Elektrolytwiderstand bei der Temperatur T ,
 $R_{el,0}$ = Elektrolytwiderstand bei der Temperatur T_0 ,
 T, T_0 = Temperatur in K,
 b = Konstante.

Für den Wert der Temperaturkonstante b finden sich folgende Angaben, z. B. /7/:

$b = 2872$ bei 70 % r. F.

$b = 2971$ bei 88 % r. F.

3.3 Versuchsbeschreibung

Zunächst wurde die Funktionsfähigkeit der eingebauten Multi-Ring-Elektroden für die ausgewählten Prüfkörper überprüft. Schadhafte Stecker und Kabel wurden ausgetauscht. Lediglich für Prüfkörper 31 (Flugaschezement, $z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,7$) konnte die volle Funktionsfähigkeit der Multi-Ring-Elektrode nicht mehr hergestellt werden, da ein Bruch im Kopf der Elektrode zur Unterbrechung der elektrischen Verbindung zu den Meßringen geführt hat.

Da die Prüfkörper seit etwa einem Jahr im Klima $20 \pm 1 \text{ °C}$ und 70 % r. F. lagerten und somit für diese Umgebungsfeuchte bereits konstante Widerstandsprofile vorlagen, wurden die Meßergebnisse als Ausgangspunkt für die spätere Kalibrierung des Meßverfahrens (s. Abschnitt 4) gewählt.

Im Anschluß an die Funktionsüberprüfung der Multi-Ring-Elektroden und die Messung bei 20 °C und 70 % r. F. wurden die Prüfkörper in einem Klimaraum mit $20 \pm 1 \text{ °C}$ und 80 % r. F. eingelagert. Nach einer Lagerungsdauer von etwa vier Monaten wurden keine signifikanten Änderungen im Widerstandsprofil mehr festgestellt, d. h. der Zustand der Gleichgewichtsfeuchte war erreicht. Die Abschlußmessung nach 140tägiger Lagerung unter diesen Umgebungsbedingungen ging als weiterer Meßwert in die Kalibrierung ein.

Die abschließende Lagerung erfolgte im Feuchtraum bei annähernd 100 % r. F., wobei darauf geachtet wurde, daß sich auf der Betonoberfläche keine Wasserfilme durch Tropfwasser ausbilden konnten. In etwa konstante Feuchtigkeitsverhältnisse bzw. Widerstandswerte wurden nach einer Lagerungsdauer von drei Monaten erreicht. Die für die Kalibrierung des Meßverfahrens maßgebende Abschlußmessung wurde nach 100tägiger Lagerung durchgeführt.

Anhand der ermittelten umgebungsabhängigen Widerstandsverläufe für konstante Feuchtigkeitsverhältnisse im Beton wurde die Kalibrierung des Meßverfahrens mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden durchgeführt (s. Abschnitt 4).

3.4 Versuchsauswertung

Oberflächennahe Betonschichten sind in besonderem Maße den Umwelteinflüssen unterworfen und liefern daher Meßwerte, die vom Verlauf der Meßwerte der tieferliegenden Meßstellen zum Teil erheblich abweichen können. Hiervon sind insbesondere die ersten 5 bis 10 mm des Betons betroffen. Die Ergebnisse der Widerstandsmessungen in diesem Bereich werden beispielsweise durch Karbonatisierung sowie kurzfristige Klimaschwankungen stark beeinflusst. Auch bei guter Nachbehandlung weicht der Beton der oberflächennahen Schicht vom Bauteilinneren ab, da

- durch Wasserabsonderung beim Einbringen und Verdichten eine gegenüber dem Kernbereich andere Zusammensetzung entsteht,
- in der Schalungszone (etwa das 0,6fache des Größtkorns) die Matrix-Zuschlag-Verteilung nicht homogen verteilt vorliegt (Randeffekt) und
- bei Lagerung an Luft in oberflächennahen Betonschichten Hydratationsgrade von nur 40 - 70 % zu erwarten sind /10/.

Zum anderen erreichen die Elektrolytwiderstände des Betons in der Regel mit wachsender Nähe zu der Betonoberfläche eine Größenordnung, die sich meßtechnisch gesehen an der oberen Grenze oder bereits außerhalb des Meßbereiches befindet. Aus diesen Gründen bleiben die ersten 10 mm von der Betonoberfläche gesehen - d. h. in der Regel der erste Meßwert der Multi-Ring-Elektrode in einer Tiefe von etwa 6 mm - bei der Auswertung der Meßweltergebnisse unberücksichtigt.

Des weiteren sei darauf hingewiesen, daß es beim Einbau der Multi-Ring-Elektroden der älteren Bauweise zu geringen Abweichungen des planmäßigen Abstandes von 2,5 mm zwischen der ersten Ring-Elektrode und der Betonoberfläche gekommen ist. Die dadurch bedingte tiefenabhängige Verschiebung der Elektrolytwiderstände wurde bei der Auswertung der Widerstandsprofile berücksichtigt und durch eine Änderung der Einbautechnik für zukünftige Anwendungen der Multi-Ring-Elektrode ausgeschlossen.

Die zunächst einbaubedingte unbeabsichtigte Verschiebung der Widerstandsprofile erwies sich jedoch für die Kalibrierung des Sensors als äußerst nützlich, da sich anhand der gegeneinander verschobenen Profile der Verlauf des Widerstandes über die Tiefe besser interpretieren läßt (s. z. B. Bilder 6, 12, 14, 15 und 18). Die funktionale Übereinstimmung der Elektrolytwiderstandsprofile unabhängig von der Einbautiefe des Sensors zeigt, daß ein sehr präziser Einbau der Multi-Ring-Elektrode nicht zwingend notwendig ist, sofern die exakte Tiefenlage der Meßbringe bekannt ist und bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden kann.

4 KALIBRIERUNG

4.1 Einführung in die Problemstellung

Mit Hilfe der Multi-Ring-Elektrode konnten Widerstandsprofile in der Betonrandzone für eine Vielzahl von Einflußgrößen erstellt werden /1, 2/. Bisher war es jedoch nur möglich anhand der ermittelten Widerstandsprofile qualitative Aussagen, z. B. über den Feuchtegehalt eines Betons, zu treffen. Ziel ist es das Meßverfahren mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden so zu kalibrieren, daß den mit diesem Sensor gemessenen zeit- und tiefenabhängigen Widerständen unmittelbar Betonfeuchtigkeitsgehalte zugeordnet werden können. Hierzu ist es zunächst erforderlich die ermittelten Elektrolytwiderstandsprofile eines Betons einer äquivalenten Umgebungsfeuchte (ambient relativ humidity RH_A) zu zuordnen:

{tiefenabhängiger Widerstand} + {betontechnische Einflußgrößen}
 ≡ äquivalente Umgebungsfeuchte

$$\{R(x)\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Zementart} \\ \text{Wassercementwert} \\ \text{Alter} \end{array} \right\} \equiv RH_A \quad (2)$$

Diese äquivalente Umgebungsfeuchte (RH_A) entspricht einer konstanten Umgebungsfeuchte, bei der sich im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte (Definition s. Abschnitt 3.2) der gemessene Widerstand in der zugehörigen Tiefe einstellen würde. Die äquivalente Umgebungsfeuchte entspricht daher insbesondere bei häufig wechselhaften Umgebungsbedingungen nicht der unmittelbaren Umgebungsfeuchte des Betons.

Unter Ausnutzung bekannter Berechnungsverfahren läßt sich mit Hilfe der äquivalenten Umgebungsfeuchte und den Einflußparametern, die sich aus der Betonzusammensetzung ergeben, entsprechend der Gleichung (3) auf quantitative Ergebnisse, wie zum Beispiel auf die Feuchte des Betons (RH_B), schließen.

$$RH_A + x + \left\{ \begin{array}{c} \text{Zementart} \\ \text{Wasserzementwert} \\ \text{Alter} \end{array} \right\} \equiv RH_B \quad (3)$$

Kalibrieren der Multi-Ring-Elektrode bedeutet deshalb in diesem Zusammenhang zunächst eine Beschreibung der Widerstandsverläufe, wie sie sich in Abhängigkeit von betontechnischen Einflußgrößen (Zementart und -gehalt, Wasserzementwert) unter definierten Lagerungsbedingungen (Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse) ergeben. Auf das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angewandte Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Feuchte des Betons (RH_B) wird in Abschnitt 5 eingegangen.

4.2 Einfluß des Betonalters (Hydratationsgrad)

Der Verlauf der Widerstände in Abhängigkeit vom Betonalter liefert - sofern Randeinflüsse ausgeschlossen werden können - eine Aussage über den zeitlichen Verlauf und den Grad der Hydratation des Zementsteins. In oberflächennahen Schichten sind neben Hydratationsvorgängen vor allem aber Austrocknungsprozesse für die Entwicklung des elektrolytischen Widerstandes von Beton maßgebend. Hierauf wurde bereits ausführlich im vorangegangenen Forschungsvorhaben /1/ eingegangen.

Die dreidimensionale Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem tiefenabhängigen Elektrolytwiderstand des Betons und dem Betonalter vor abgeschlossener Hydratation ist vergleichsweise kompliziert und im vorliegenden Fall eher von theoretischem Interesse, da die Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone eines Bauwerks mit Hilfe einer direkt einbetonierten Multi-Ring-Elektrode in der Regel erst zu einem Zeitpunkt erfolgt, an dem das zur Hydratation des Zementsteins benötigte Porenwasser gebunden ist. Auch im nachträglichen Einbau in bestehende Bauwerke findet der Sensor seinen Einsatz im weitgehend vollständig hydratisierten Beton. Aus diesem Grund erfolgt die Kalibrierung des Meßverfahrens mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden für Betone, deren Hydratation des Zementsteins weitestgehend abgeschlossen ist.

Die Auswertung der Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens /1/ hatte gezeigt, daß der Einfluß des Betonalters (Hydratationsgrad) auf die Elektrolytwiderstände vor allem in Abhängigkeit von der verwendeten Zementart variiert. Innerhalb einer Zementart führten die untersuchten Betonzusammensetzung mit unterschiedlichen Wasserzementwerten und Zementgehalten im Rahmen der üblichen Meßstreuungen zu keiner signifikanten Trennung der gemessenen Elektrolytwiderstände. Nach etwa einem Jahr wurden für alle Prüfkörper, unabhängig von der verwendeten Zementart bzw. Betonzusammensetzung, nahezu konstante Widerstandsverläufe ermittelt. Die Kalibrierung der Multi-Ring-Elektrode sollte deshalb für Meßwerte erfolgen, die bei Prüfkörpern mit einem Herstellungsalter von über einem Jahr ermittelt wurden. Da im vorliegenden Fall die Prüfkörper bei Forschungsbeginn bereits ein Alter von etwa 1500 Tagen hatten, kann davon ausgegangen werden, daß Hydratationsprozesse keinen Beitrag zum Elektrolytwiderstand mehr leisten und Änderungen im Widerstand ausschließlich auf wechselnde Feuchtigkeitsbedingungen zurückgeführt werden können.

4.3 Funktionaler Zusammenhang zwischen tiefenabhängigem Elektrolytwiderstand des Betons und der Umgebungsfeuchte

4.3.1 Herleitung des funktionalen Zusammenhangs für Portlandzementbeton

Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem tiefenabhängigen Elektrolytwiderstand des Betons und der Umgebungsfeuchte herstellen zu können, wurden entsprechend der Versuchsbeschreibung in Abschnitt 3.3 für die in Tabelle 1 aufgelisteten Prüfkörper Widerstandsprofile im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte für drei unterschiedliche Lagerungsbedingungen (70, 80 und 100 % r. F. bei 20 °C) bestimmt. Bild 6 zeigt beispielhaft die für die Prüfkörper 6 und 7, hergestellt mit Portlandzement PZ 35F (Zementgehalt 300 kg/m³, Wasserzementwert 0,6), ermittelten Ergebnisse der Elektrolytwiderstandsmessungen.

Aus der Literatur /11/ ist bekannt, daß sich die Feuchteverteilung eines Betons in Abhängigkeit vom Abstand zur Betonoberfläche durch eine Exponentialfunktion beschreiben läßt. Ferner wurde nachgewiesen, daß zwischen dem spezifischen Widerstand und dem Feuchtegehalt des Zementsteins ein funktionaler Zusammenhang besteht, der sich ebenfalls mit guter Genauigkeit durch eine Exponentialfunktion annähern läßt /12/. Da die im Rahmen dieser Untersuchungen mit Hilfe der Multi-Ring-Elektrode bestimmten Widerstandsprofile ausschließlich auf Veränderungen des Feuchtegehaltes zurückgeführt werden können, wurde auch in diesem Fall ein Ansatz in Form einer Exponentialfunktion gewählt:

$$R = (\alpha + \beta \cdot e^{(\gamma/x)}) \cdot 1000 = f(x, \alpha, \beta, \gamma) \quad (4)$$

mit R = Elektrolytwiderstand in Ω ,
 x = Abstand von der Betonoberfläche in mm,
 α, β, γ = Koeffizienten der Funktionsgleichung.

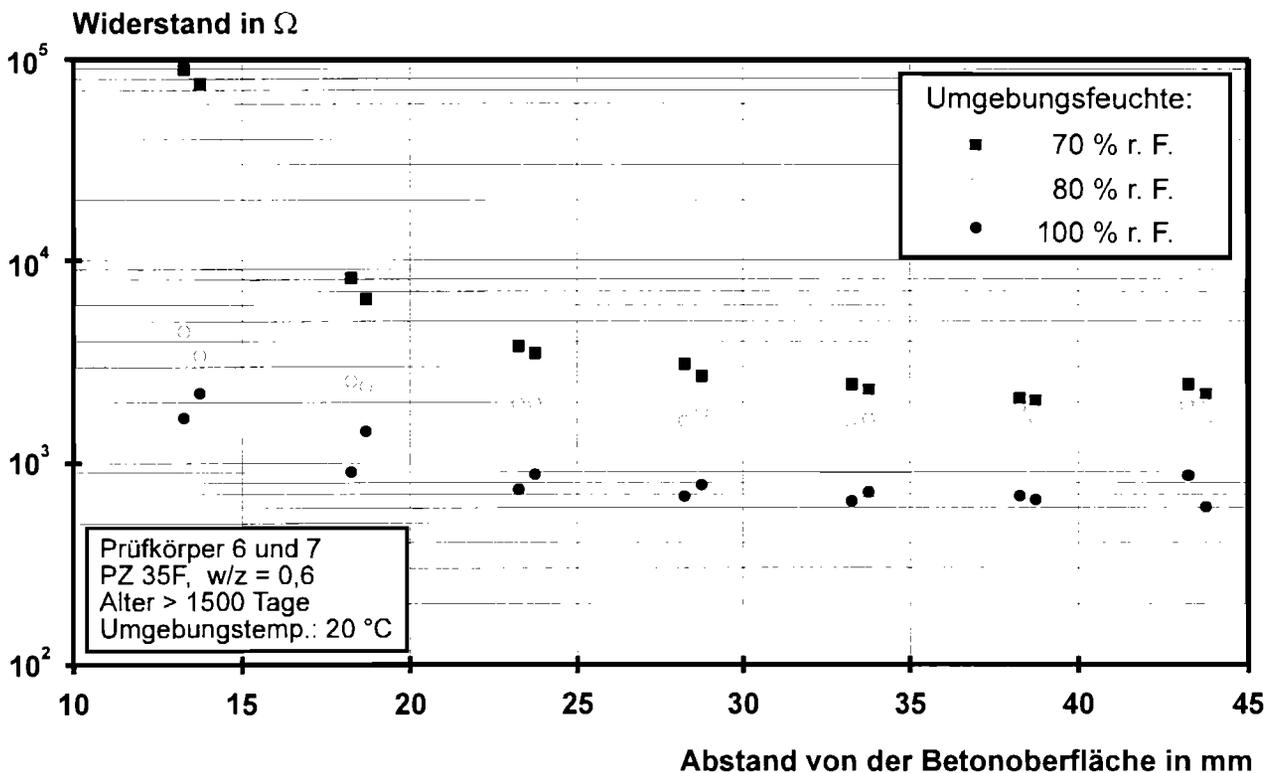


Bild 6: Gemessene Widerstandsprofile von Prüfkörpern hergestellt mit Portlandzement (PZ 35F, $z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,6$) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

Zur Überprüfung der Tauglichkeit des in Gleichung (4) aufgestellten funktionalen Zusammenhangs wurden zunächst Regressionsberechnungen für die in Bild 6 dargestellten Ergebnisse von Widerstandsprofilen ermittelt an Portlandzementbeton für unterschiedliche Umgebungsfeuchtigkeiten durchgeführt. Die Koeffizienten α , β und γ der Funktionsgleichung (4) wurden so bestimmt, daß die Summe der Quadrate der Ordinatendifferenzen zwischen dem ausgeglichenen Graphen und den Meßpunkten zum Minimum wurde. Um eine gute Annäherung der Funktionsgraphen insbesondere in dem Bereich der Bewehrung (Betonüberdeckung $\geq 25 \text{ mm}$) zu erreichen, wurde die Fehlerminimierung in diesem Bereich optimiert.

Das Ergebnis der mittels Regression berechneten Widerstandsprofile wurde in Bild 7 den mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen Widerstandswerten gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung des inhomogenen Baustoffes Beton und der damit verbundenen Streuungen der Meßwerte kann festgehalten werden, daß der in Gleichung (4) gewählte Ansatz geeignet ist, den Zusammenhang zwischen tiefenabhängigem Elektrolytwiderstand und Umgebungsfeuchtigkeit mathematisch zu beschreiben. Tabelle 3 beinhaltet in Abhängigkeit von der untersuchten Umgebungsfeuchtigkeit die in der Regressionsrechnung ermittelten Werte für die Koeffizienten α , β und γ der Funktionsgleichung (4).

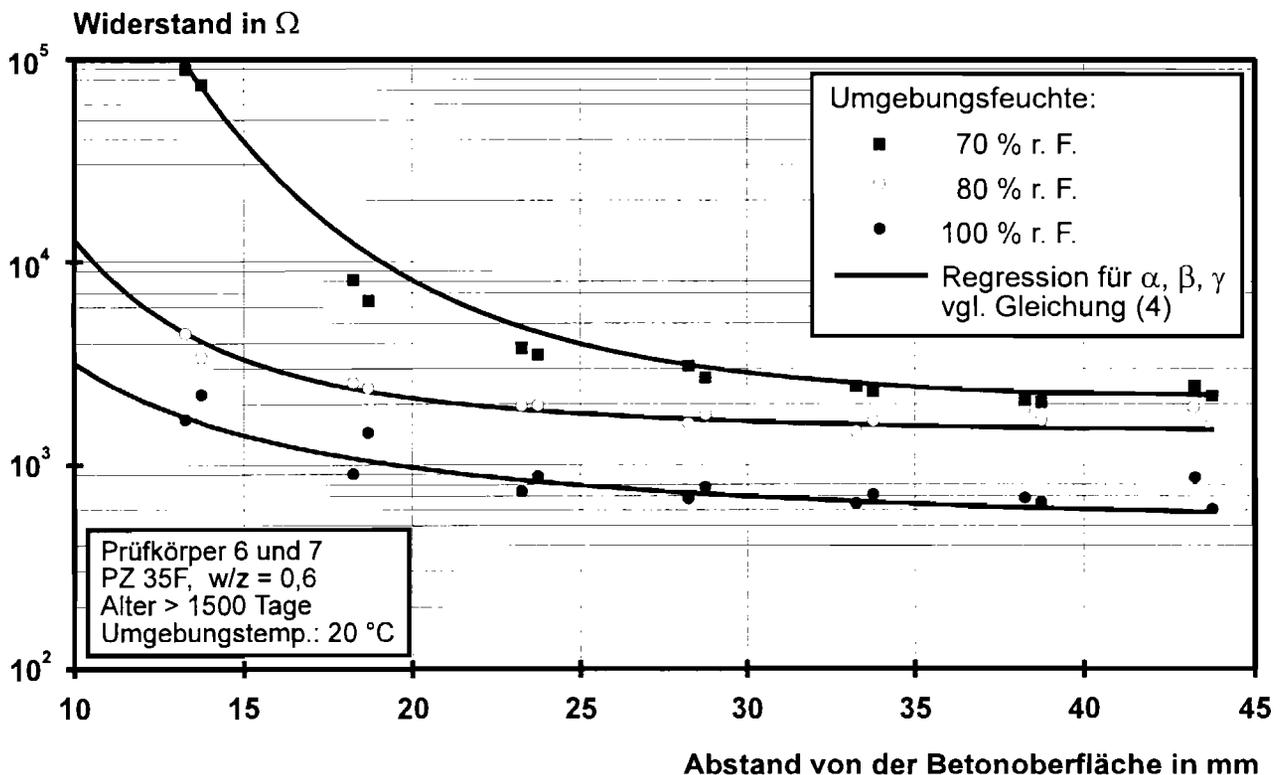
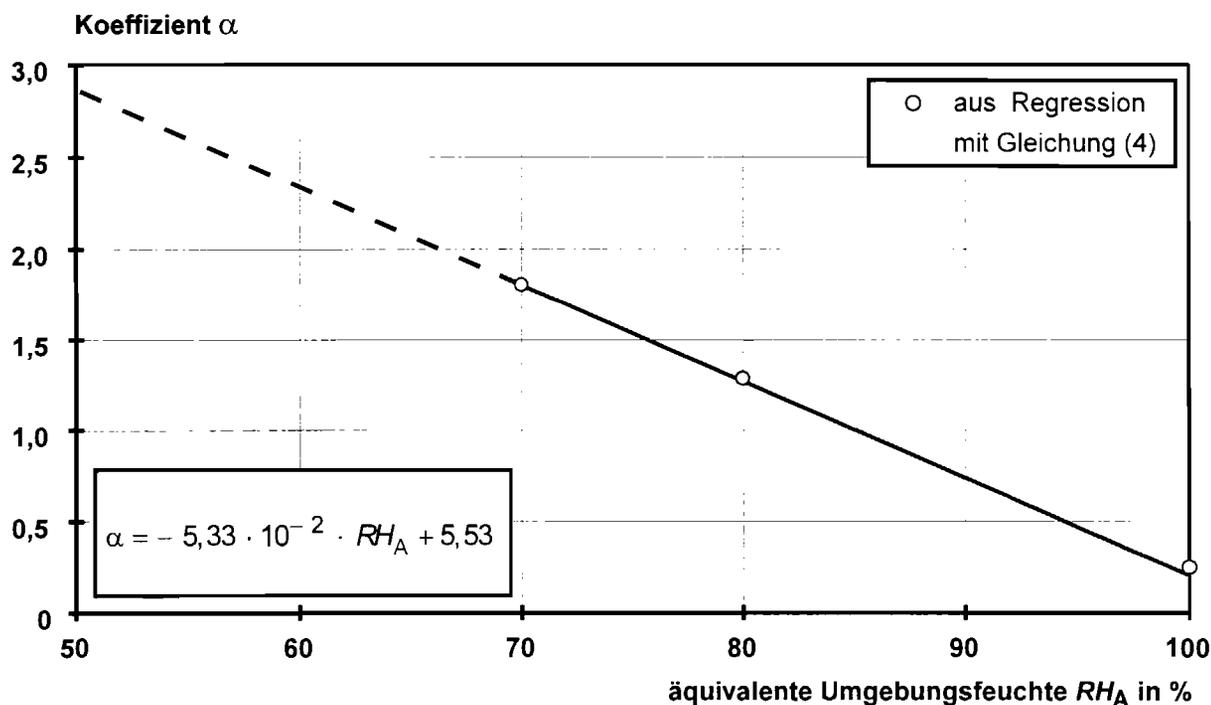


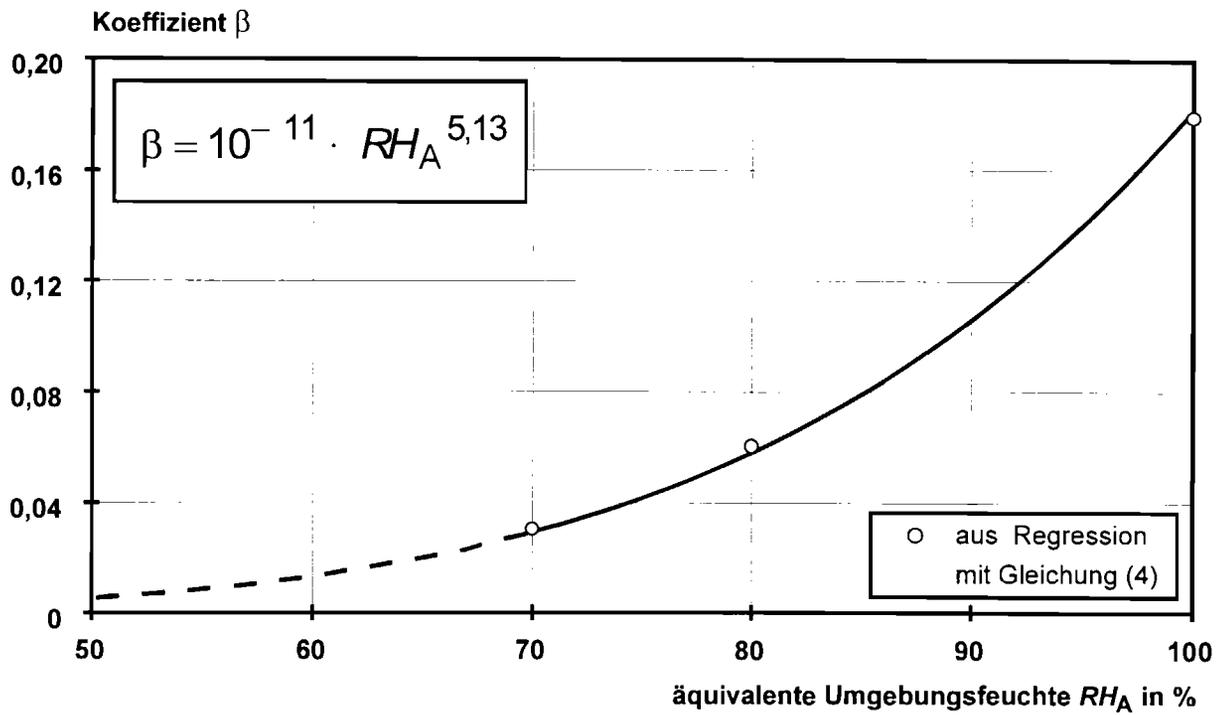
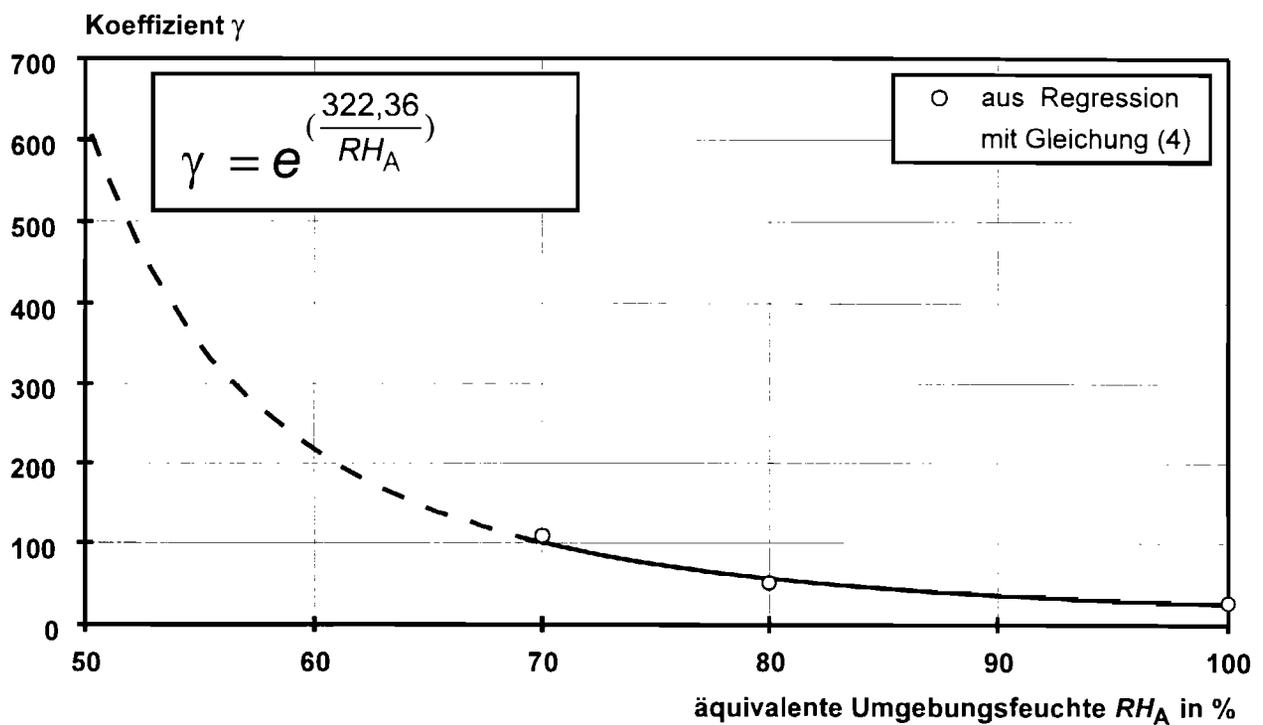
Bild 7: Gemessene und berechnete Widerstandsprofile für Prüfkörper hergestellt mit Portlandzement (PZ 35F, $z = 300 \text{ kg/m}^3$, w/z = 0,6) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

Tabelle 3: Koeffizienten α , β und γ der Funktionsgleichung (4)

Umgebungsfeuchtigkeit	Koeffizient der Funktionsgleichung (4)		
	α	β	γ
%	-	-	-
1	2	3	4
70	1,80	0,03	98
80	1,26	0,07	51
100	0,20	0,19	28

Zwischen den Koeffizienten α , β sowie γ und der Umgebungsfeuchte besteht eine Abhängigkeit, die sich wiederum mit Hilfe von Funktionsgleichungen beschreiben läßt. Die Bilder 8, 9 und 10 zeigen jeweils den abgeleiteten funktionalen Zusammenhang zwischen den Koeffizienten α , β sowie γ und der Umgebungsfeuchte. Der mathematische Ansatz der Funktionsgleichung (Funktionsklasse) wurde jeweils so gewählt, daß der ausgleichende Graph die Werte möglichst gut annähert, ohne die physikalischen Randbedingungen zu verletzen (eindeutige Zuordnung und ein positiver Wertebereich ohne Null).

Bild 8: Funktionsbeschreibung des Koeffizienten α

Bild 9: Funktionsbeschreibung des Koeffizienten β Bild 10: Funktionsbeschreibung des Koeffizienten γ

Nach Einsetzen der Funktionsgleichungen der Koeffizienten α , β und γ (siehe Bilder 8, 9 und 10) in die Gleichung (4) ergibt sich folgende Formel (5) zur näherungsweise Berechnung von tiefen- und umgebungsabhängigen Widerstandsprofilen von Portlandzementbeton:

$$R = (\alpha + \beta \cdot e^{(\gamma/x)}) \cdot 1000 = \quad (5)$$

$$= \left[(-5,33 \cdot 10^{-2} \cdot RH_A + 5,53) + (10^{-11} \cdot RH_A^{5,13}) \cdot e^{\left(\frac{322,36}{RH_A} \cdot x \right)} \right] \cdot 1000 =$$

$$= f(x, RH_A)$$

Die Ergebnisse der Umsetzung der Gleichung (5) in eine graphische Darstellung sind in Bild 11 dargestellt. Hierin wurden die berechneten tiefenabhängigen Elektrolytwiderstände für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte des Betons in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte für eine Temperatur von 20 °C aufgetragen.

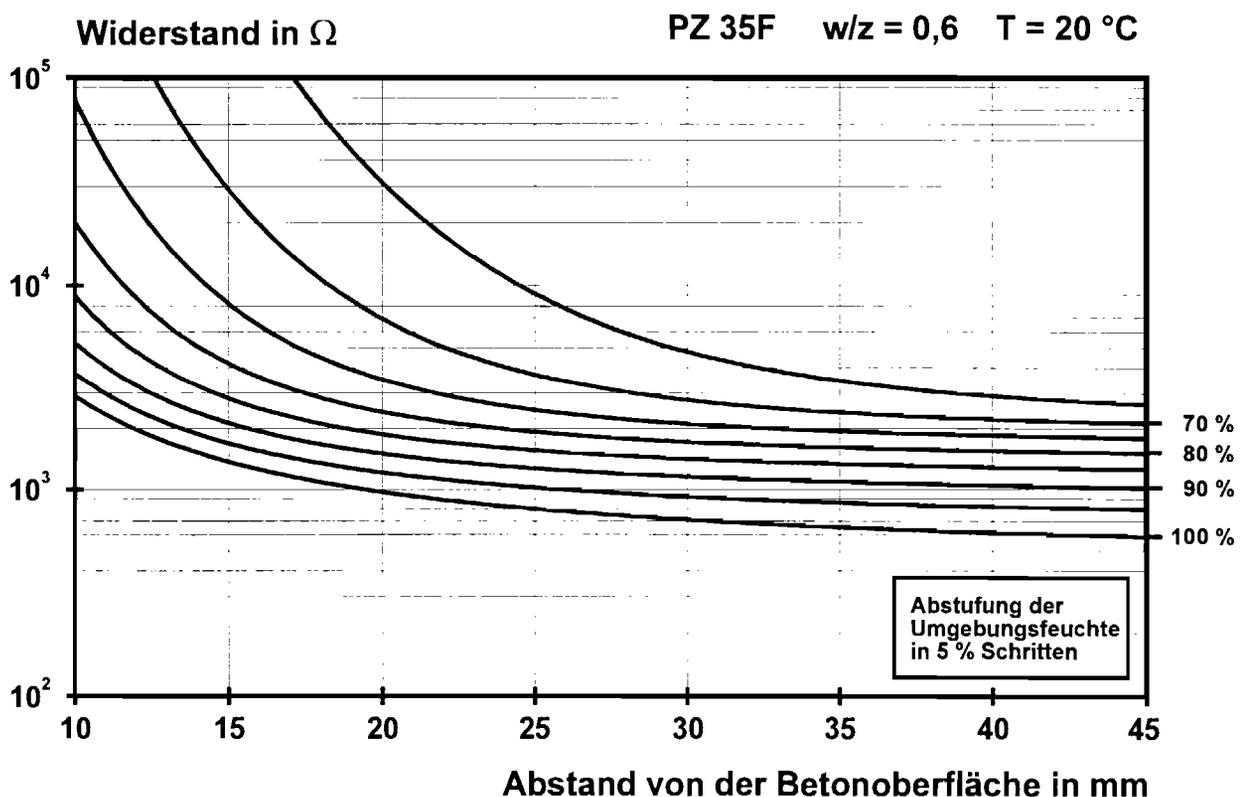


Bild 11: Berechnete tiefenabhängige Elektrolytwiderstandsprofile für unterschiedliche Umgebungsfeuchten

Die berechneten Elektrolytwiderstandsprofile in Bild 11 verdeutlichen, daß

- der Elektrolytwiderstand des Betons mit steigender Umgebungsfeuchte sinkt,
- der Einfluß der Umgebungsfeuchte mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche abnimmt,
- die Elektrolytwiderstände bei gleichbleibender Umgebungsfeuchte im Bereich der Kernfeuchte (Betonüberdeckung > etwa 35 mm) nahezu konstant sind.

Nachdem die Tauglichkeit des gewählten Ansatzes für Portlandzementbeton, hergestellt mit einem Wasserzementwert von 0,6, prinzipiell nachgewiesen wurde, soll im folgenden Abschnitt die Übertragbarkeit der Gleichung (5) auf Hochofenzementbeton überprüft werden.

4.3.2 Erweiterung des funktionalen Zusammenhangs auf Hochofenzementbeton

Die Ergebnisse der Elektrolytwiderstandsmessungen an Prüfkörpern, hergestellt mit Hochofenzement (Hüttensandanteil 42 M.-%, Zementgehalt 300 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,6), im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte unter Umgebungsfeuchtigkeiten von 70, 80 und 100 % r. F. (20 °C) wurden in Bild 12 zusammengestellt.

Erwartungsgemäß wurden bei der Verwendung von Hochofenzement (Hüttensandanteil 42 M.-%) aufgrund der dichteren Porenstruktur im Vergleich zu Portlandzementbeton (s. Bild 6) für alle Tiefenlagen höhere Elektrolytwiderstände gemessen. Der tiefenabhängige Kurvenverlauf der Elektrolytwiderstände stellt sich jedoch bei den untersuchten Hochofenzementbetonen in ähnlicher Weise ein, wie er bereits bei den mit Portlandzement hergestellten Prüfkörpern beobachtet wurde. Aus diesem Grund wurde der Einfluß des Hüttensandanteils bei der rechnerischen Bestimmung des Elektrolytwiderstandes durch einen Faktor δ berücksichtigt, mit dem die Koeffizienten α , β und γ der Gleichung (4 bzw. 5) zu multiplizieren sind:

$$R = (\alpha \cdot \delta + \beta \cdot \delta \cdot e^{(\gamma \cdot \delta / x)}) \cdot 1000 = \quad (6)$$

$$= \left[\delta \cdot (-5,33 \cdot 10^{-2} \cdot RH_A + 5,53) + (\delta \cdot 10^{-11} \cdot RH_A^{5,13}) \cdot e^{\left(\frac{\delta \cdot e^{\left(\frac{322,36}{RH_A} \right)}}{x} \right)} \right] \cdot 1000$$

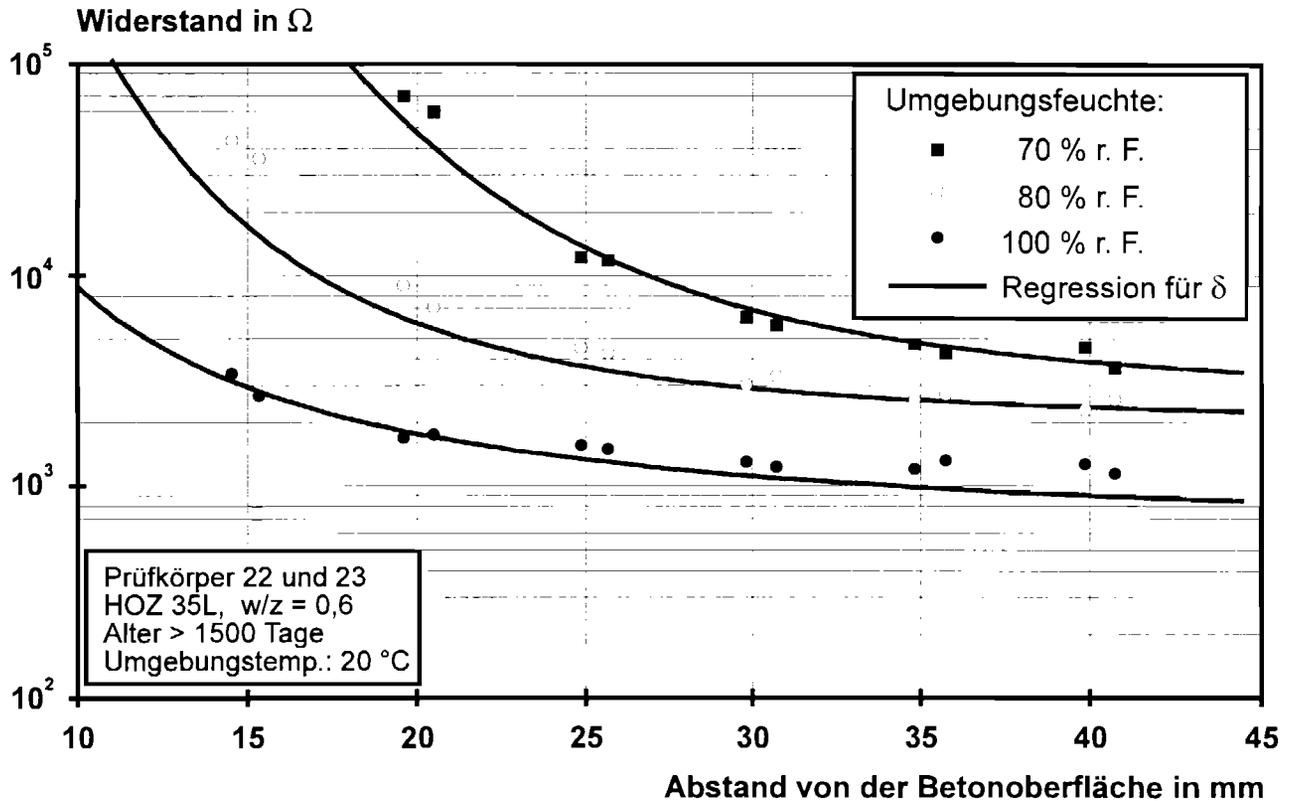


Bild 12: Gemessene und berechnete Widerstandsprofile für Prüfkörper hergestellt mit Hochofenzement (HOZ 35L, Hüttensandanteil 42 M.-%, $z = 300 \text{ kg/m}^3$, w/z = 0,6) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

Unter Ansatz der Gleichung (6) wurde der Faktor δ zu 1,4 (bei einem Hüttensandanteil von 42 M.-%) bestimmt. Das Ergebnis der berechneten Widerstandsprofile wurde in Bild 12 den mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen Widerstandswerten gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, daß der zur Berücksichtigung der Zementart erweiterte Ansatz in Gleichung (6) - unter Berücksichtigung der üblichen Meßwertstreuungen - geeignet ist, den funktionalen Zusammenhang zwischen tiefenabhängigem Elektrolytwiderstand und Umgebungsfeuchtigkeit zu beschreiben. Der Faktor δ ergibt sich bei Verwendung von 100 % Portlandzementklinker zu 1,0 (s. Abschnitt 4.3.1) und nimmt mit zunehmendem Hüttensandgehalt zu ($\delta = 1,4$ bei einem Hüttensandanteil von 42 M.-%). Aufgrund der Tatsache, daß im Rahmen dieser Untersuchungen ausschließlich Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil von 42 M.-% verwendet wurde, konnte - im Gegensatz zu den Koeffizienten α , β und γ - für den Faktor δ keine Funktionsgleichung in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt aufgestellt werden.

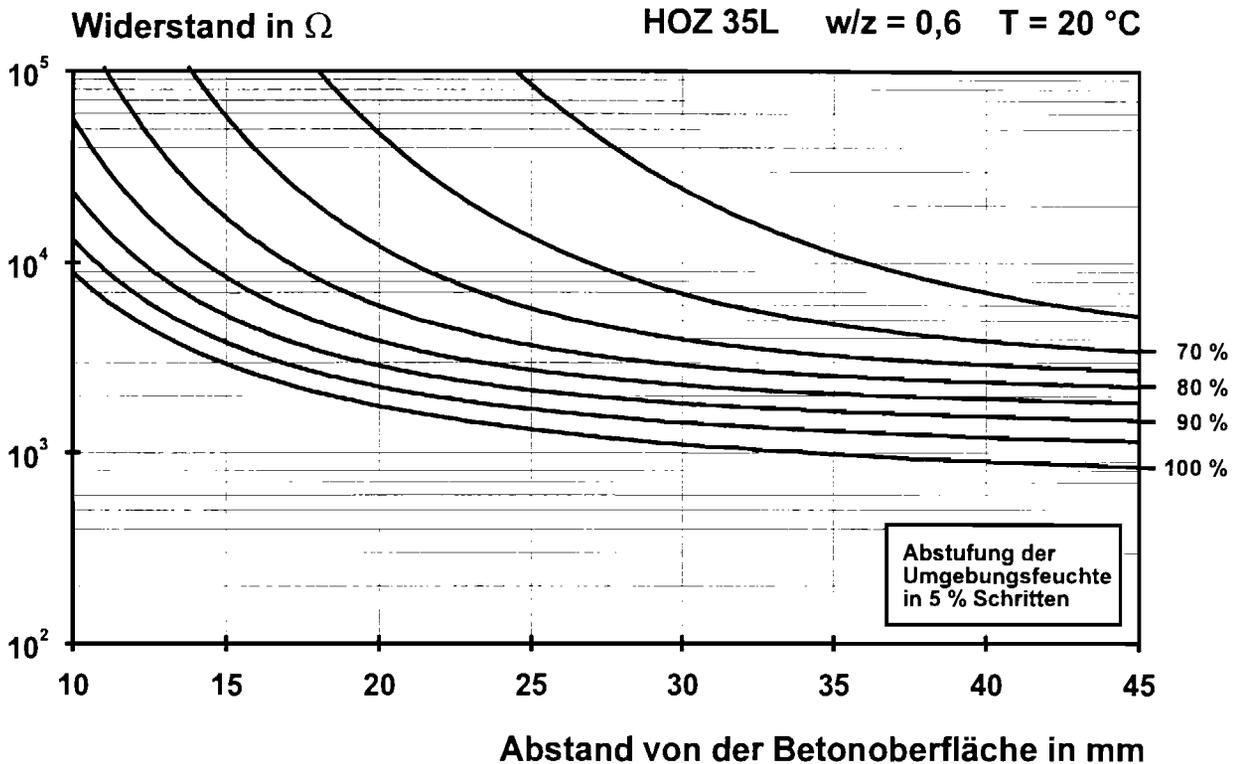


Bild 13: Berechnete tiefenabhängige Elektrolytwiderstandsprofile für unterschiedliche Umgebungsfeuchten

Bild 13 zeigt für einen Hüttensandanteil von 42 M.-% ($\delta = 1,4$) die Umsetzung der Gleichung (6) in eine graphische Darstellung. In Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte wurden die berechneten tiefenabhängigen Elektrolytwiderstände für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte des Betons eingezeichnet.

4.3.3 Erweiterung des funktionalen Zusammenhangs auf Flugaschezementbeton

Die Ergebnisse der Elektrolytwiderstandsmessungen an Prüfkörpern, hergestellt mit Flugaschezement (Flugascheanteil 26 M.-%, Zementgehalt 300 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,6), im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte unter Umgebungsfeuchtigkeiten von 70, 80 und 100 % r. F. (20 °C) wurden in Bild 14 zusammengestellt.

Unter Ansatz der Gleichung (6) (s. Abschnitt 4.3.2) wurde bei der Verwendung von Flugaschezement der Faktor δ zu 1,6 (Flugascheanteil 26 M.-%) bestimmt. Das Ergebnis der berechneten Widerstandsprofile wurde in Bild 14 den mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen Widerstandswerten gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt auch hier, daß der zur Berücksichtigung der Zementart erweiterte Ansatz in Gleichung (6) - unter Berücksichtigung der üblichen Meßwertstreuungen - geeignet ist, den funktionalen Zusammenhang zwischen tiefenabhängigem Elektrolytwiderstand und Umgebungsfeuchtigkeit zu beschreiben. Aufgrund der Tatsache, daß im Rahmen dieser Untersuchungen ausschließlich Flugaschezement mit einem Flugascheanteil von 26 M.-% verwendet wurde, kann für den Faktor δ keine Funktionsgleichung in Abhängigkeit vom Flugaschegehalt aufgestellt werden.

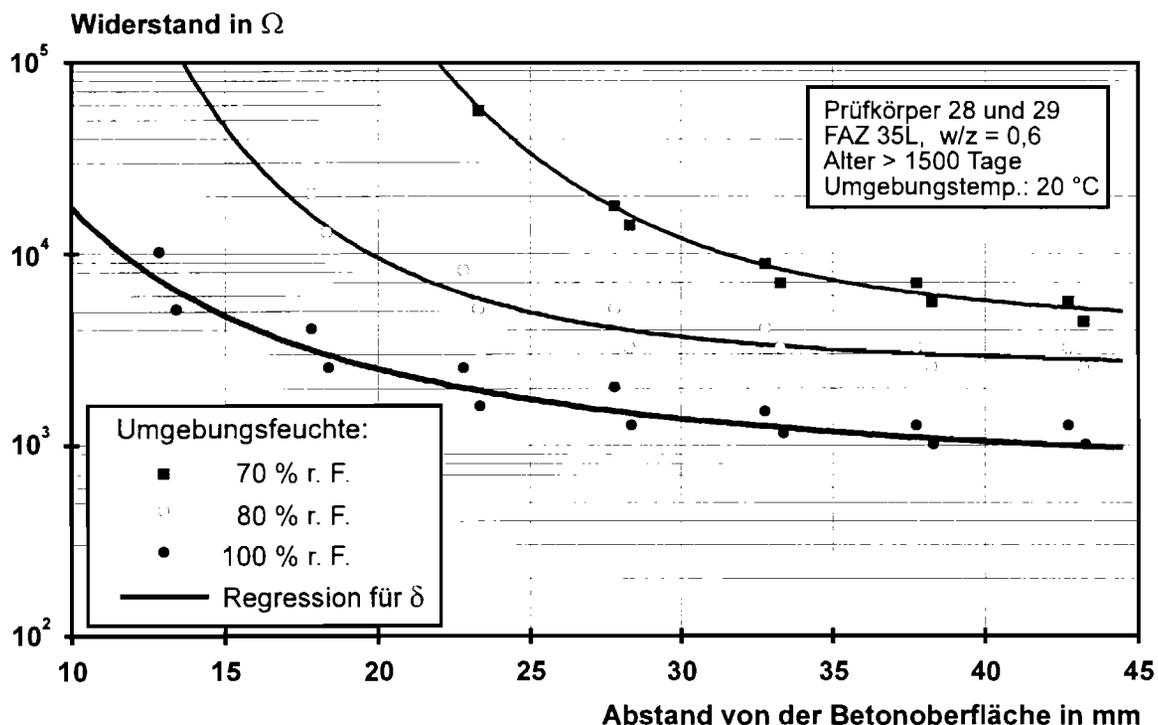


Bild 14: Gemessene und berechnete Widerstandsprofile für Prüfkörper hergestellt mit Flugaschezement (FAZ 35L, Flugascheanteil 26 M.-%, $z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,6$) für unterschiedliche Umgebungsbedingungen

Bild 15 zeigt für einen Flugaschegehalt von 26 M.-% ($\delta = 1,6$) die Umsetzung der Gleichung (6) in eine graphische Darstellung. In Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte wurden die berechneten tiefenabhängigen Elektrolytwiderstände für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte des Betons eingezeichnet.

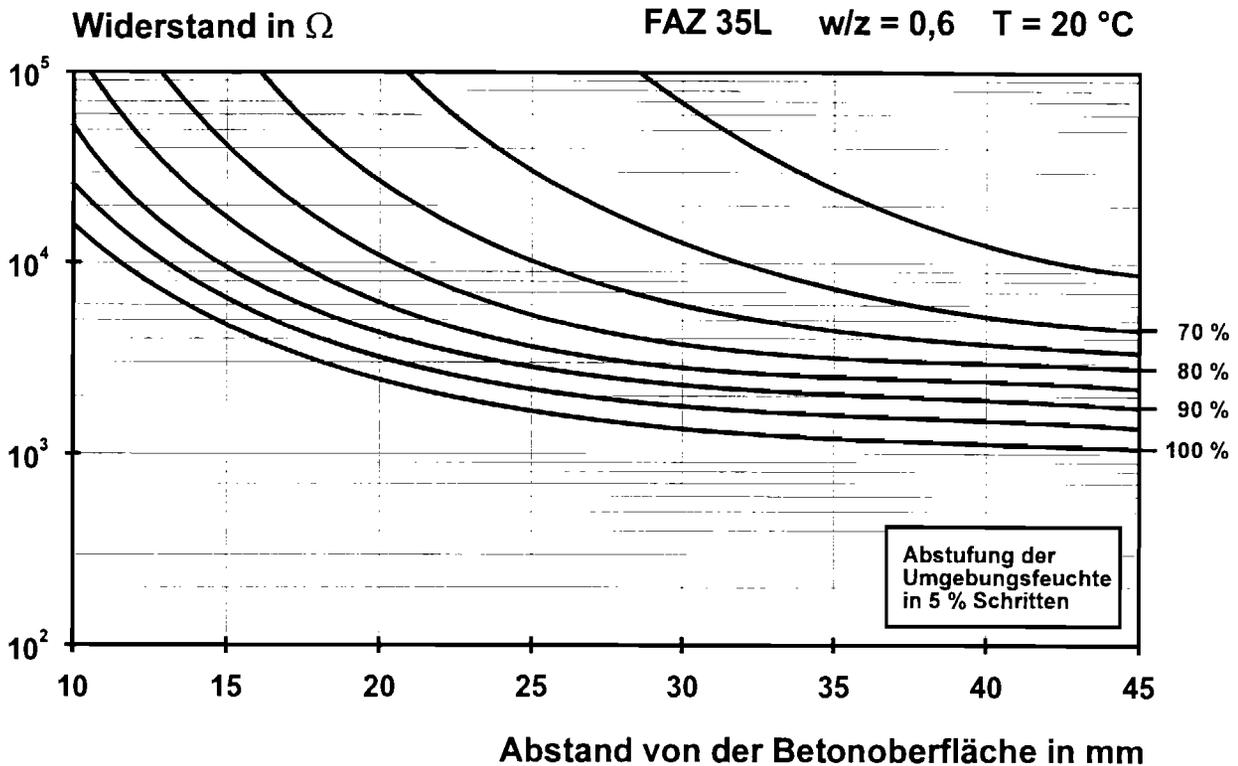


Bild 15: Berechnete tiefenabhängige Elektrolytwiderstandsprofile für unterschiedliche Umgebungsfeuchten

4.4 Einfluß der Mischungszusammensetzung

Die Auswertung der im Rahmen des vorangegangenen Forschungsvorhabens /1/ erzielten Ergebnisse hatte gezeigt, daß der wesentliche Einflußfaktor auf die Höhe des Elektrolytwiderstands in der verwendeten Zementart besteht. Innerhalb einer Zementart führten die untersuchten Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten und Zementgehalten im Rahmen der üblichen Meßstreuungen zu keiner signifikanten Trennung der gemessenen Elektrolytwiderstände. Es ist daher zu erwarten, daß auch im Rahmen dieser Untersuchungen die Variation von Wasserzementwert und Zementgehalt entsprechend der Betonzusammensetzung gemäß Tabelle 1 zu keiner wesentlichen Änderung des tiefenabhängigen Elektrolytwiderstandverlaufes führen wird.

Die Ergebnisse der Elektrolytwiderstandsmessungen für Portlandzementbeton unterschiedlicher Betonzusammensetzung für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte sind in Bildern 16, 17 und 18 für Umgebungsfechtigkeiten von 70, 80 und 100 % r. F. (20 °C) dargestellt.

Daraus geht hervor, daß sich in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchtigkeit für Betonüberdeckungen von größer als 25 mm - im Rahmen der üblichen Meßwertstreuungen - annähernd gleiche Elektrolytwiderstände einstellen. In oberflächennahen Bereichen (bis etwa 20 mm) war für den mit einem Wasserzementwert von 0,7 hergestellten Prüfkörper Nr. 15 ein starker Anstieg des Elektrolytwiderstandes zu verzeichnen, der mit abnehmender Umgebungsfeuchtigkeit anwuchs. Diese Widerstandszunahme ist auf einen größeren Kapillarporenanteil verbunden mit dem entsprechenden Austrocknungsverhalten zurückzuführen. Zwischen den Widerstandsprofilen der Betone hergestellt mit Wasserzementwerten von 0,5 (Prüfkörper Nr. 1) und 0,6 (Prüfkörper Nr. 6 und 7) ist kein markanter Unterschied festzustellen. Das bedeutet, daß die relative Feuchte der Betone sich in diesem Fall kaum unterscheidet.

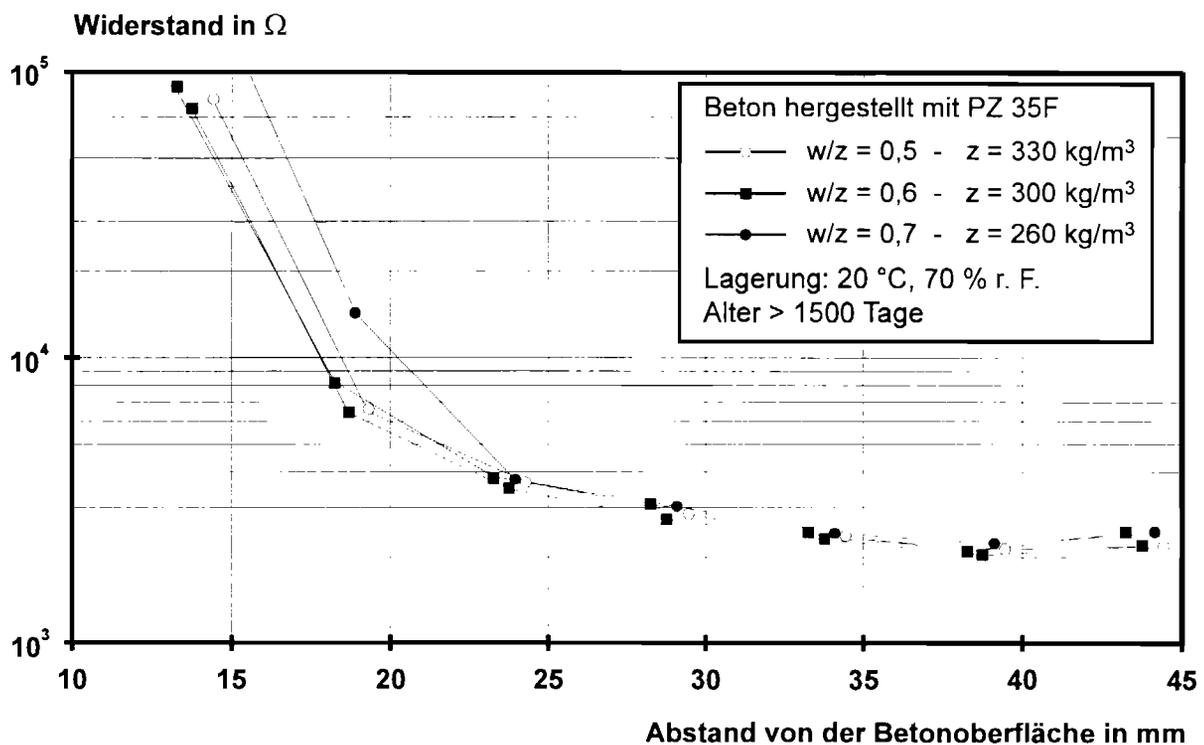


Bild 16: Einfluß des Wasserzementwertes auf den Elektrolytwiderstand von Portlandzementbeton (Lagerung 20 °C, 70 % r. F.)

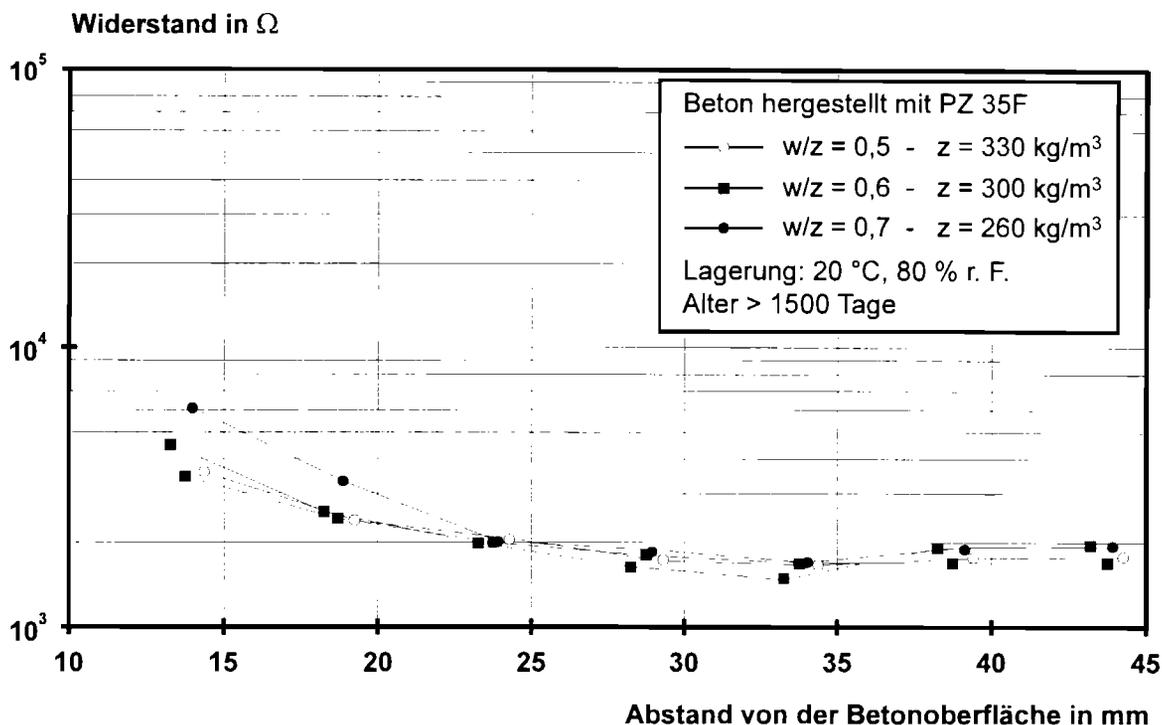


Bild 17: Einfluß des Wassorzementwertes auf den Elektrolytwiderstand von Portlandzementbeton (Lagerung 20 °C, 80 % r. F.)

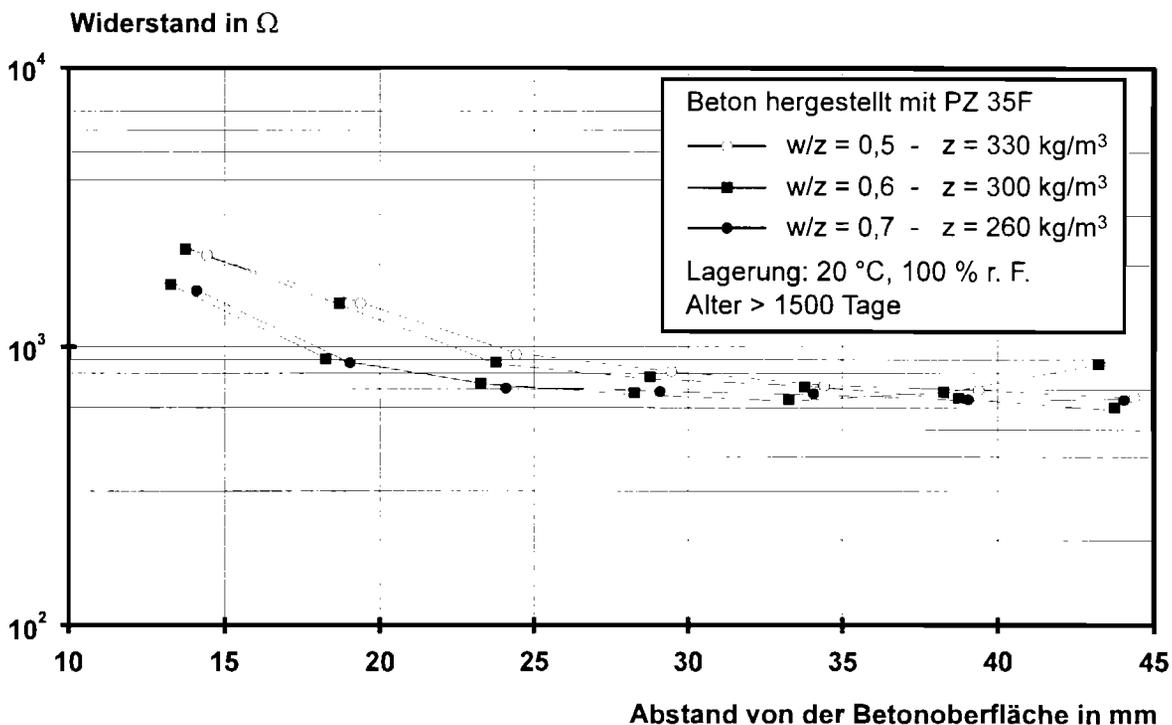


Bild 18: Einfluß des Wassorzementwertes auf den Elektrolytwiderstand von Portlandzementbeton (Lagerung 20 °C, 100 % r. F.)

Die entsprechenden Ergebnisse der Elektrolytwiderstandsmessungen für Hochofenzementbeton unterschiedlicher Betonzusammensetzung für den Zustand der Gleichgewichtsfeuchte sind in Bild 19 für Umgebungsfeuchtigkeiten von 70, 80 und 100 % r. F. (20 °C) dargestellt. Auch hier ist erwartungsgemäß - vergleichbar den Ergebnissen erzielt für Portlandzementbeton - für den mit einem Wasserzementwert von 0,7 hergestellten Prüfkörper Nr. 25 ein stärkerer Anstieg des Elektrolytwiderstandes gegenüber den Prüfkörpern Nr. 22 und 23 (Wasserzementwert 0,6) in oberflächennahen Bereichen zu verzeichnen.

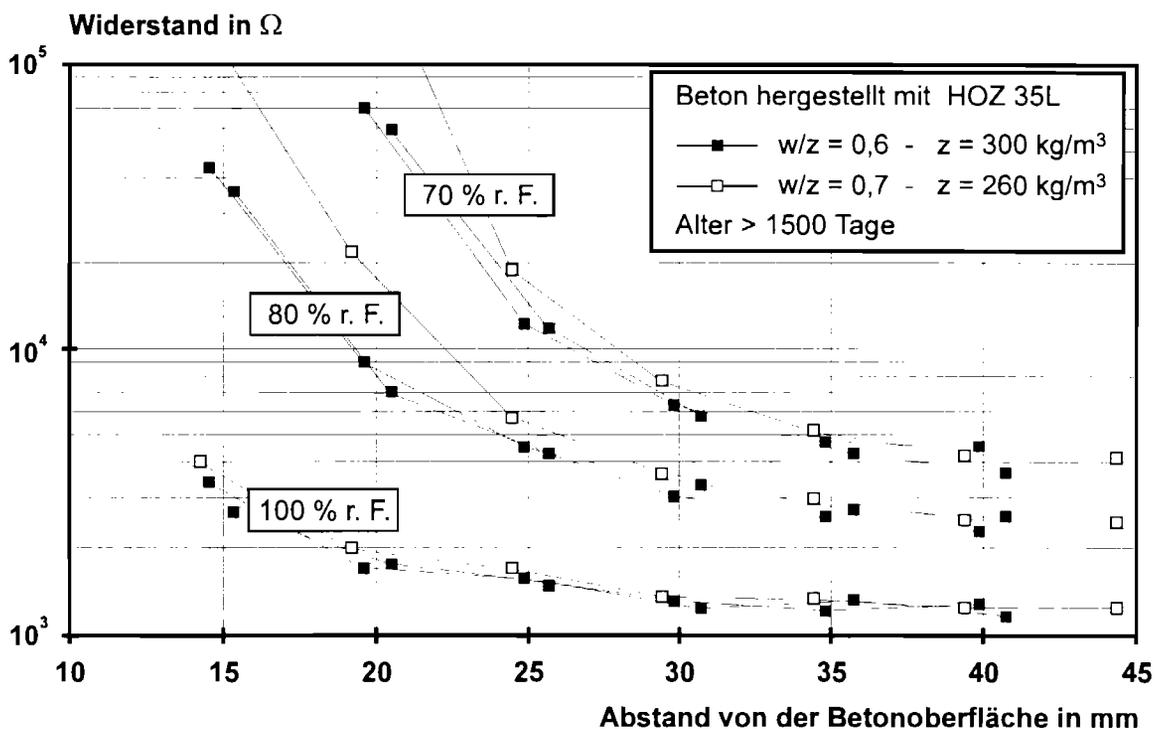


Bild 19: Einfluß des Wasserzementwertes auf den Elektrolytwiderstand von Hochofenzementbeton für unterschiedliche Umgebungsfeuchtigkeiten

Eine vergleichende Betrachtung des Einflusses des Wasserzementwertes bei der Verwendung von Flugaschezement konnte nicht durchgeführt werden, da - wie in Abschnitt 3.3 beschrieben - ein Bruch im Kopf der Elektrode des Prüfkörpers 31 (Flugaschezement, $z = 260 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,7$) zur Unterbrechung der elektrischen Verbindung zu den Meßringen geführt hat.

Nimmt man für den Kernbereich eines Betons an, daß die Menge und die chemische Zusammensetzung des verdampfenden Wassers in den Kapillarporen unabhängig von dem Wasserzementwert des Betons ist, dann haben der veränderte Anteil der Poren am Gesamtvolumen und die veränderte Porenstruktur einen mit diesem Verfahren kaum meßbaren Einfluß auf den Elektrolytwiderstand des Betons.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß aufgrund der Tatsache, daß bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Betonzusammensetzungen gleichzeitig sowohl der Wasserzementwert als auch der Zementgehalt variiert wurde, eine eindeutige Trennung des Einflusses allein von Wasserzementwert bzw. vom Zementgehalt nicht möglich ist.

4.5 Zusammenfassung

Der beschriebene funktionale Zusammenhang zwischen dem Elektrolytwiderstand des Betons und der Umgebungsfeuchte beruht auf einer statistischen Auswertung von Meßergebnissen. Die Genauigkeit, mit der sich die gemessenen Widerstände annähern lassen, bestätigt die Tauglichkeit des gewählten Ansatzes (gemäß Gleichung (6)).

In Kenntnis dieses funktionalen Zusammenhangs zwischen Elektrolytwiderstand und Umgebungsfeuchte wird im folgenden Abschnitt - unter Ausnutzung bekannter Ansätze zur Bestimmung der Feuchteverteilung - ein Berechnungsmodell erstellt, das den gemessenen Elektrolytwiderständen (input-data) die zugehörigen Feuchteverteilungen (output-data) zuordnet.

5 BERECHNUNGSMODELL ZUR BESTIMMUNG DER FEUCHTEVERTEILUNG

5.1 Berechnungsansatz

Mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 aufgestellten Gleichung (6) kann dem Elektrolytwiderstand eines Betons eine äquivalente Umgebungsfeuchte (RH_A) zugeordnet werden. Die Kenntnis der äquivalenten Umgebungsfeuchte (RH_A) eines Betons wiederum macht es möglich, bekannte Ansätze zur Bestimmung der Feuchteverteilung zu nutzen. Es hat sich gezeigt, daß ein modifizierter Ansatz von Parrott /11, 13/ im Rahmen der Messungen mit Multi-Ring-Elektroden am besten zur Bestimmung von Feuchteprofilen geeignet war.

$$RH_B = RH_A + (100 - RH_A) \cdot f(t) \quad (7)$$

$$f(t) = \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{b}\right)} \quad (8)$$

$$b = \frac{x^{0,85} \cdot (128 - z_A) \cdot \left(\frac{w}{z} - 0,03\right)}{11,4} \quad (9)$$

mit RH_B = relativer Feuchtigkeitsgehalt des Betons in %,
 RH_A = äquivalente Umgebungsfeuchtigkeit in %,
 t = Betonalter in Tage,
 x = Abstand von der Betonoberfläche in mm,
 z_A = Anteil des Zementaustauschs durch Hüttensand oder Flugasche in %,
 w/z = Wasserzementwert.

Die folgenden zwei Beispiele sollen die Vorgehensweise zur Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone veranschaulichen. Beide Beispiele beschreiben denselben Prüfkörper (PZ 35F, Zementgehalt 300 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,6, Alter 540 Tage, Lagerung im Freien). Durch vergleichende Betrachtung der beiden Beispiele sollen die Auswirkungen einer kurzzeitigen Klimaveränderung aufgezeigt werden.

5.2 Bestimmung der Feuchteverteilung - Beispiele

5.2.1 Beispiel 1

In Tabelle 4 wurden alle maßgeblichen Input- und Outputdaten zusammengestellt. Der Tabellenkopf enthält auf der linken Seite die betontechnischen Daten (Zementart und -gehalt, Wasserzementwert, Betonalter und Lagerungsart), während im rechten Teil der Meßzeitpunkt (Datum) und die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Umgebungsbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) eingetragen wurden.

Zeile 2 der Tabelle 4 enthält die Betonüberdeckung der Meßpunkte (x) der Multi-Ring-Elektrode (Mittelwert zwischen zwei benachbarten Ringen), Zeile 3 die zum Meßzeitpunkt ermittelten Elektrolytwiderstände ($R_{el, T=0}$). Da die Kalibrierung der Multi-Ring-Elektrode für eine konstante Temperatur von 20 °C durchgeführt wurde, müssen die bei einer Temperatur von 0 °C gemessenen Multi-Ring-Meßwerte zunächst mit Hilfe der Gleichung (1) korrigiert werden. Nach der Temperaturkorrektur (s. Abschnitt 3.2) mit einer mittleren Temperaturkonstanten von $b = 2900$ ergeben sich die in Zeile 4 dokumentierten Elektrolytwiderstände ($R_{el, T=20}$) für die entsprechenden Tiefenlagen der Zeile 2.

Tabelle 4: Input- und Outputdaten Beispiel 1

Prüfkörper: PZ 35F $z = 300 \text{ kg/m}^3$ $w/z = 0,6$ Alter: 540 d Lagerung im Freien				Datum: 19. Januar 1994 um 12 ⁰⁰ Außentemperatur: 0 °C relative Luftfeuchte: 78 % kein Niederschlag				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Abstand von der Betonoberfläche	x	mm	13,75	18,75	23,75	28,75	33,75
3	Gemessener MRE-Widerstand	$R_{el, T=0}$	Ω	40.370	4.530	2.850	2.400	2.310
4	Temperaturkorrektur MRE-Widerstand	$R_{el, T=20}$	Ω	19.550	2.194	1.380	1.162	1.119
5	Äquivalente Umgebungsfeuchte	RH_A	%	72,4	81,7	87,1	88,8	88,4
6	Berechnete relative Betonfeuchte	RH_B	%	75,1	84,0	89,0	90,7	90,6

Diesen temperaturkorrigierten Widerständen ($R_{el, T=20}$, Zeile 4) kann mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 aufgestellten Gleichung (6) eine äquivalente Umgebungsfeuchte RH_A zugeordnet werden. Da sich die Gleichung (6) nicht ohne weiteres umformen läßt, erfolgt eine iterative Annäherung an die äquivalente Umgebungsfeuchte mit Hilfe des Newton-Verfahrens:

Für $x = \text{konstant}$ gilt:

$$R = f(RH_A) \quad (10)$$

Gesucht wird die Nullstelle der Funktion

$$R = f(RH_A) - R_{\text{gemessen}} \quad (11)$$

Die Gleichung für die Näherungsfolge lautet:

$$RH_{A(n+1)} = RH_{A_n} - \frac{f(RH_{A_n})}{f'(RH_{A_n})}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (12)$$

Iterative Anwendung bis:

$$\frac{f(RH_{An})}{f'(RH_{An})} < k, \quad k \ll 1 \quad (13)$$

Die beschriebene Iteration nach dem Newton-Verfahren läßt sich am schnellsten mit Hilfe eines entsprechenden Computerprogramms durchführen. Das Ergebnis dieses Iterationsverfahrens führt zu den in Tabelle 4, Zeile 5 eingetragenen äquivalenten Umgebungsfeuchten. Zur besseren Anschauung der Zusammenhänge sind die gemessenen Widerstände in Bild 20 zusammen mit den errechneten Widerstandsprofilen für Portlandzement (vergleiche Bild 11) dargestellt. Die äquivalenten Umgebungsfeuchten (RH_A) können ebenso aus Bild 20 abgelesen werden, wenn gleich auch mit einer geringeren Genauigkeit.

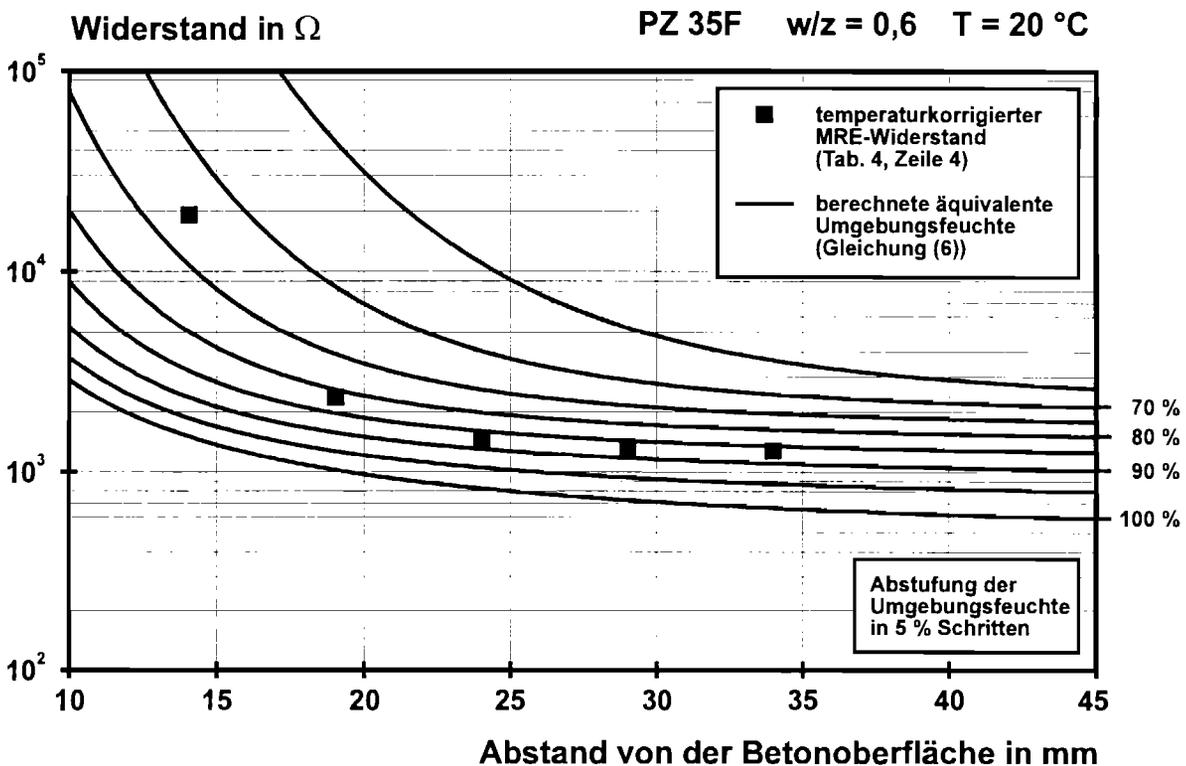


Bild 20: Berechnete Widerstandsprofile in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte und mit der Multi-Ring-Elektrode gemessene Widerstände

Bei Kenntnis der äquivalenten Umgebungsfeuchte kann dann nach Gleichung (7) die relative Betonfeuchte (RH_B) der unterschiedlichen Tiefenlagen bestimmt und als Feuchteprofil dargestellt werden. Bild 21 zeigt das berechnete Feuchteprofil des ausgewählten Prüfkörpers (s. Tabelle 4, Zeile 6). Es ist deutlich zu erkennen, daß die relative Betonfeuchte bis in den Kernbereich ($\geq 25-30$ mm von der Betonoberfläche) ansteigt und dann nahezu konstant verläuft. Der Pfeil an der Ordinatenachse gibt die Umgebungsfeuchte an der Oberfläche des Betons (relative Luftfeuchtigkeit) zum Zeitpunkt der Messung an.

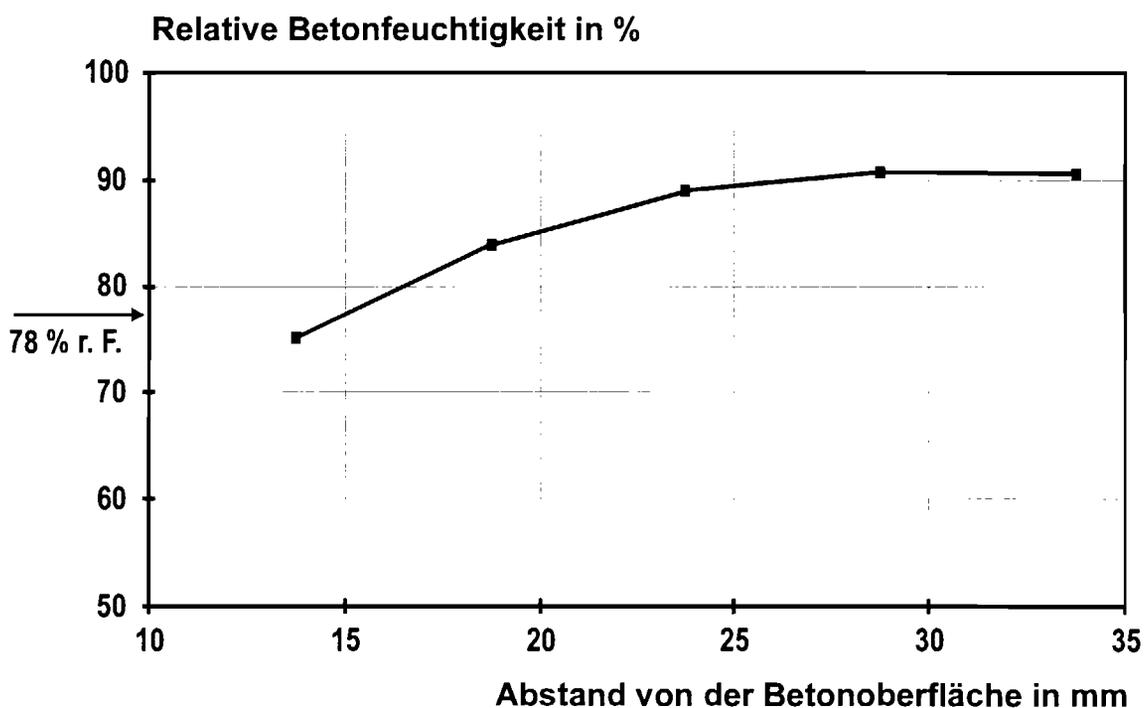


Bild 21: Berechnetes Feuchteprofil für Beispiel 1

5.2.2 Beispiel 2

Unter veränderten Umgebungsbedingungen wurden für den in Beispiel 1 vorgestellten Prüfkörper drei Tage später die in Tabelle 5 zusammengestellten Daten registriert. In Bild 22 wurden die mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen Elektrolytwiderstände beider Meßtermine (Beispiel 1, Tabelle 4, Zeile 4 und Beispiel 2, Tabelle 5, Zeile 4) nach Temperaturkorrektur ($R_{el, T=20}$) in das Diagramm der berechneten äquivalenten Umgebungsfeuchte eingetragen. Die mit Hilfe des Iterationsverfahrens nach Newton berechneten äquivalenten Umgebungsfeuchtigkeiten für das zweite Beispiel können der Tabelle 5, Zeile 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Input- und Outputdaten Beispiel 2

Prüfkörper: PZ 35F $z = 300 \text{ kg/m}^3$ $w/z = 0,6$ Alter: 543 d Lagerung im Freien				Datum: 22. Januar 1994 um 12 ⁰⁰ Außentemperatur: 5 °C relative Luftfeuchte: 95 % Niederschlag				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Abstand von der Betonoberfläche	x	mm	13,75	18,75	23,75	28,75	33,75
3	Gemessener MRE-Widerstand	$R_{el, T=5}$	Ω	9.670	3.180	2.210	1.804	1.706
4	Temperaturkorrektur MRE-Widerstand	$R_{el, T=20}$	Ω	5.669	1.864	1.296	1.058	1.000
5	Äquivalente Umgebungsfeuchte	RH_A	%	78,5	84,8	88,6	90,9	90,8
6	Berechnete relative Betonfeuchte	RH_B	%	80,6	86,7	90,2	92,4	92,6

Der Verlauf der Widerstandsprofile ist erwartungsgemäß sehr ähnlich, wobei die veränderten Feuchtebedingungen und der Niederschlag zum Zeitpunkt der zweiten Messung (Beispiel 2) erwartungsgemäß zu niedrigeren Elektrolytwiderständen geführt hat. Es ist auch deutlich zu erkennen, daß der Einfluß des Niederschlages auf den Elektrolytwiderstand des Betons mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche abnimmt. Im Bereich der Kernfeuchte ($\geq 25 - 30$ mm von der Betonoberfläche) ist die Differenz der Elektrolytwiderstände nur noch sehr gering.

Analog zu Beispiel 1 wurde wiederum nach Gleichung (7) die relative Betonfeuchte (RH_B) der unterschiedlichen Tiefenlagen bestimmt und als Feuchteprofil dargestellt. Bild 23 zeigt die beiden berechneten Feuchteprofile des ausgewählten Prüfkörpers (Beispiel 1, Tabelle 4, Zeile 6 und Beispiel 2, Tabelle 5, Zeile 6). Die Pfeile an der Ordinatenachse geben die relative Luftfeuchtigkeit zum jeweiligen Meßzeitpunkt an.

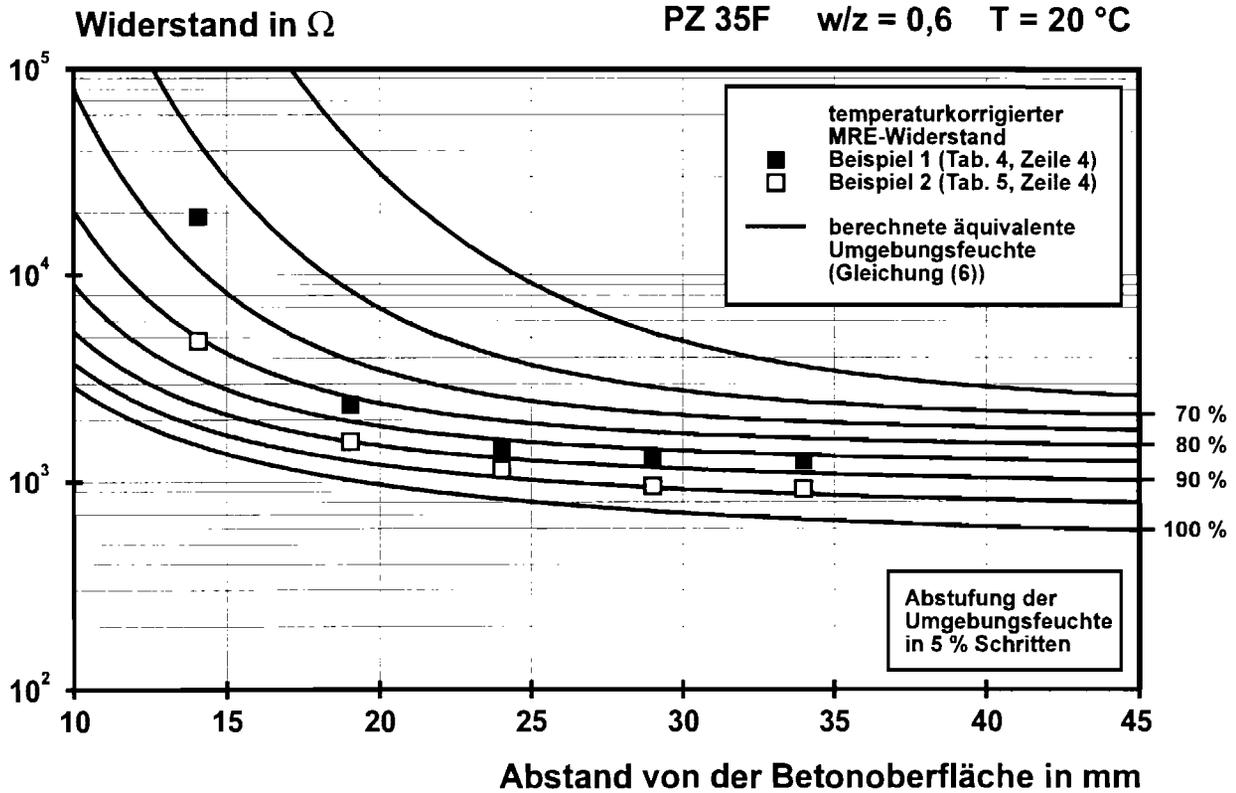


Bild 22: Berechnete Widerstandsprofile in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte und gemessene Widerstände.

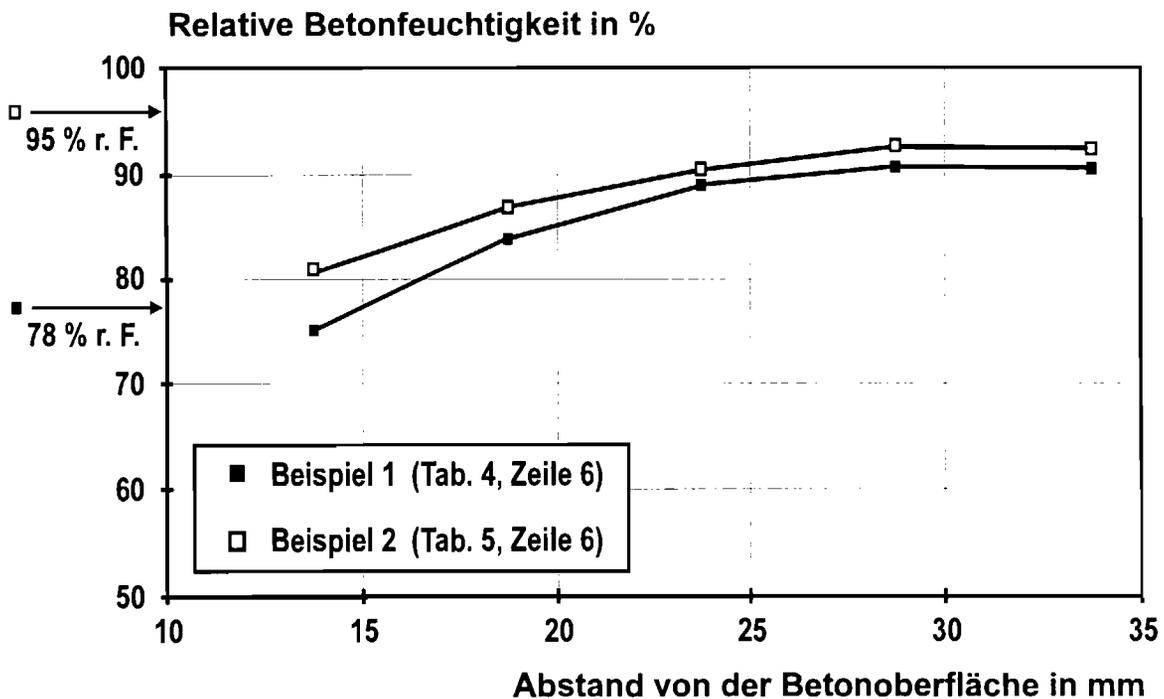


Bild 23: Berechnete Feuchteprofile eines Betons

Erwartungsgemäß hat der kurzzeitige Wetterumschwung die Feuchteverteilung insbesondere im Randbereich des Betons (≤ 20 mm von der Betonoberfläche) verändert (s. Bild 23). Im Bereich der Kernfeuchte ($\geq 25 - 30$ mm von der Betonoberfläche) ist keine nennenswerte Beeinflussung des Elektrolytwiderstandes zu verzeichnen. Die geringe Differenz der Feuchteprofile in den tieferen Schichten ab etwa 25 mm von der Betonoberfläche liegt im Bereich der Genauigkeit des Bemessungsverfahrens.

5.3 Programm zur Berechnung der Feuchteverteilung

5.3.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte das entwickelte Berechnungsmodell zur Bestimmung der Feuchteverteilung mittels Multi-Ring-Elektroden (s. Abschnitt 5.1) in ein computertaugliches Programm, bestehend aus

- Eingabemaske,
- Berechnungsalgorithmus und
- Ausgabe des Ergebnisses in tabellarischer und grafischer Form,

umgesetzt werden. Das Programm wurde in Visual-Basic für Microsoft-Excel 5.0 erstellt und ist unter Windows 3.11, Windows 95 oder Windows NT lauffähig.

5.3.2 Input

Zur Erfassung der Inputdaten wurde eine Datenmaske erstellt, in der neben Meßdatum und -uhrzeit alle notwendigen betontechnischen (Zementart und -gehalt, Wassercementwert, Betonzusatzstoffe, Betonalter und Lagerungsart) und umgebungsbedingten Daten (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, und Niederschlag) enthalten sind. Die entsprechend der zugehörigen Betonüberdeckung mit der Multi-Ring-Elektrode gemessenen Elektrolytwiderstände werden im linken Teil der Eingabe erfaßt.

Berechnung von Feuchteprofilen aus Meßwerten der Multi-Ring-Elektrode			
		Datum	19.01.1994
		Uhrzeit	12:00
Betonüberdeckung der Meßstelle in mm	gemessener Widerstand in Ohm	Umgebungstemperatur in °C	0
13,75	40370	Umgebungsfeuchte r. F. in %	78
18,75	4530	Niederschlag	Nein ↓
23,75	2850	Betonkennwerte	
28,75	2400	Zementart	PZ 35F
33,75	2310	Zementgehalt z in kg/m³	300
		Wasserzementwert w/z	0,6
		Hüttensandgehalt in M.-%	0
		Flugaschegehalt in M.-%	0
Tabellenüberschrift		Korrekturfaktor delta	1,0
Beispiel 1		Betonalter in Tagen	540
Bildunterschrift			
Beispiel 1			

Bild 24: Inputdaten - Eingabemaske des Programms zur Berechnung von Feuchteprofilen aus Meßwerten der Multi-Ring-Elektrode

5.3.3 Berechnungsalgorithmus

Die Vorgehensweise zur Berechnung von Feuchteprofilen aus gemessenen Elektrolytwiderstandsdaten der Multi-Ring-Elektrode wurde bereits ausführlich in Abschnitt 5.2 anhand von Beispielen behandelt. Das in Bild 25 dargestellte Flußdiagramm zeigt zusammenfassend den Ablauf bei der Berechnung der Feuchteprofile.

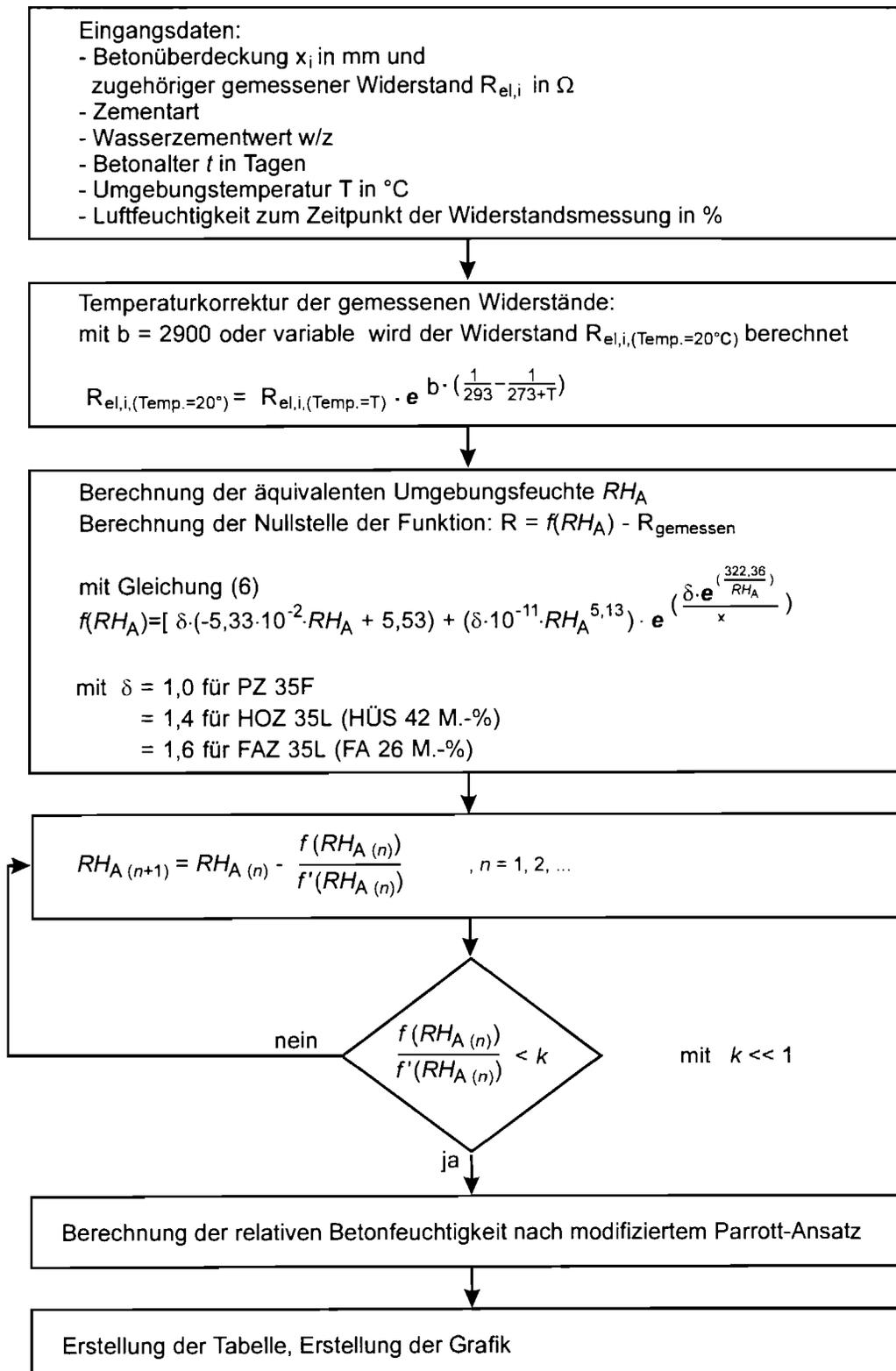


Bild 25: Flußdiagramm zur Ermittlung der relativen Betonfeuchtigkeit anhand von Widerstandswerten gemessen mit der Multi-Ring-Elektrode

5.3.4 Output

Tabelle 1: Beispiel 1

Betonkennwerte		Umgebungs-kennwerte			
Zementart: PZ 35F		Temperatur: 0 °C			
Zementgehalt: 300 Kg/m ³		rel. Luftfeuchtigkeit: 78 %			
Wassermenge: 0,6		Niederschlag: Nein			
Hüttensandgehalt: 0 M.-%		Datum: 19.01.1994			
Flugaschegehalt: 0 M.-%		Uhrzeit: 12:00			
Betonalter: 540 Tage					
Meßstelle		Widerstand		Feuchtigkeit	
Nr.:	Betonüber- deckung	gemessen	temperatur- korrigiert	berechnete äquivalente Umgebungs- feuchte	berechnete Beton- feuchtigkeit
	mm	Ω		%	
1	2	3	4	5	6
1	13,75	40370	19550	72,4	75,1
2	18,75	4530	2194	81,7	84,0
3	23,75	2850	1380	87,1	89,0
4	28,75	2400	1162	88,8	90,7
5	33,75	2310	1119	88,4	90,6

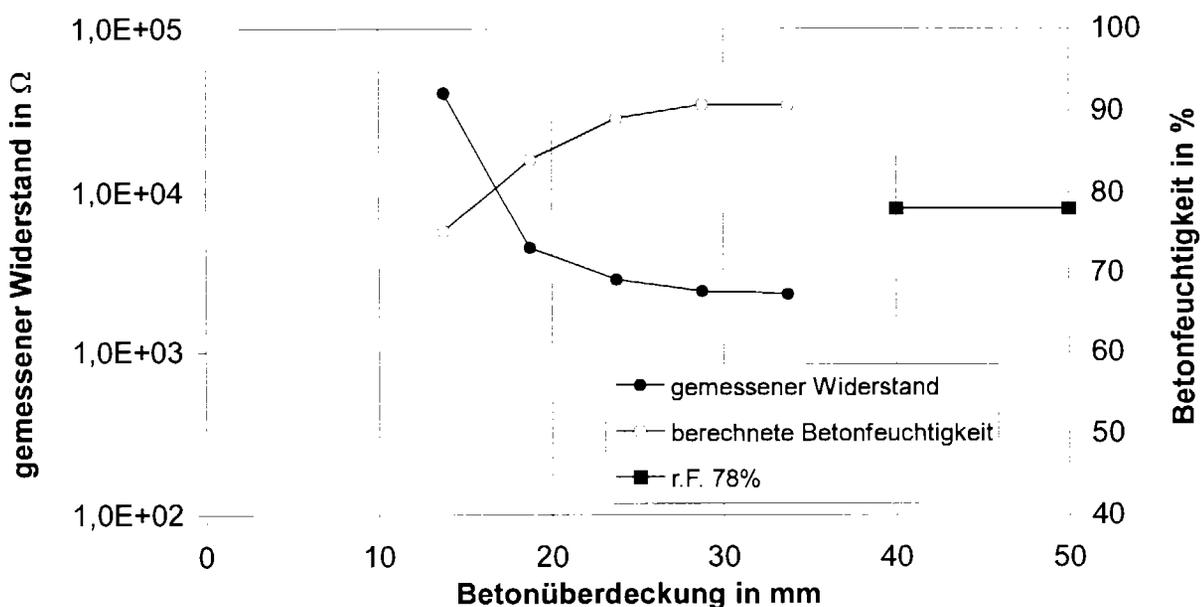


Bild 1: Beispiel 1

Bild 26: Outputdaten - Tabelle und Grafik für Beispiel 1

5.3.5 Programm

5.3.5.1 Hauptprogramm

Dim ti(8); wi(8); d(8); e(8); f(8)

Öffentlich delta

Sub auto_öffnen()

Konst Vorlage = "FEUCHTE.XLT"

GanzerName = AktiveArbeitsmappe.GanzerName

i = Länge(GanzerName)

Solange (i > 1) Und (TeilZnF(GanzerName; i, 1) <> "")

i = i - 1

EndeSolange

verzeichnis = TeilZnF(GanzerName; 1; i)

makrodatei = TeilZnF(GanzerName; i + 1)

Durchlaufe

ArbeitsmappeListe.Öffnen dateiname:=verzeichnis + Vorlage

BlattListe("Feuchte").Auswählen

Anwendung.BildschirmAktualisierung = Falsch

Setze aktuellearbeitsmappe = Anwendung.AktiveArbeitsmappe

feuchtedatei = aktuellearbeitsmappe.Name

FensterListe(makrodatei).Aktivieren

jabitte = DialogblattListe("FeuchteDialog").Zeigen

Wenn jabitte <> Falsch Dann

Mit DialogblattListe("FeuchteDialog")

ti(1) = .BearbeitungsfeldListe("ti1").Text

ti(2) = .BearbeitungsfeldListe("ti2").Text

ti(3) = .BearbeitungsfeldListe("ti3").Text

ti(4) = .BearbeitungsfeldListe("ti4").Text

ti(5) = .BearbeitungsfeldListe("ti5").Text

ti(6) = .BearbeitungsfeldListe("ti6").Text

ti(7) = .BearbeitungsfeldListe("ti7").Text

ti(8) = .BearbeitungsfeldListe("ti8").Text

wi(1) = .BearbeitungsfeldListe("Wi1").Text

wi(2) = .BearbeitungsfeldListe("Wi2").Text

wi(3) = .BearbeitungsfeldListe("Wi3").Text

wi(4) = .BearbeitungsfeldListe("Wi4").Text

wi(5) = .BearbeitungsfeldListe("Wi5").Text

```
wi(6) = .BearbeitungsfeldListe("Wi6").Text
wi(7) = .BearbeitungsfeldListe("Wi7").Text
wi(8) = .BearbeitungsfeldListe("Wi8").Text
```

```
umtemp = .BearbeitungsfeldListe("UmTemp").Text
umfeuchte = .BearbeitungsfeldListe("UmFeuchte").Text
zementart = .BearbeitungsfeldListe("Zementart").Text
zement = .BearbeitungsfeldListe("Zement").Text
anteilhuekten = .BearbeitungsfeldListe("AnteilHuetten").Text
anteilflug = .BearbeitungsfeldListe("AnteilFlug").Text
anteilhuektenflug = anteilhuekten + anteilflug
alter = .BearbeitungsfeldListe("Alter").Text
wdurchz = .BearbeitungsfeldListe("WDurchZ").Text
tabellentitel = .BearbeitungsfeldListe("TabellenTitel").Text
bildtitel = .BearbeitungsfeldListe("BildTitel").Text
Datumm = .BearbeitungsfeldListe("Datum").Text
Uhrzeit = .BearbeitungsfeldListe("Uhrzeit").Text
delta = .BearbeitungsfeldListe("Delta").Text
```

Ende Mit

BlattListe("Tabelle1").Aktivieren

ns = Bereich("B1").Wert

Wenn ns = 1 Dann

Niederschlag = "Ja"

Sonst

Niederschlag = "Nein"

Ende Wenn

FensterListe(feuchtedatei).Aktivieren

Bereich("A4").Wert = Bereich("A4").Wert + " " + zementart

Bereich("A5").Wert = Bereich("A5").Wert + " " + zement + " Kg/m³"

Bereich("A6").Wert = Bereich("A6").Wert + " " + wdurchz

Bereich("A7").Wert = Bereich("A7").Wert + " " + ZuZnF(anteilhuekten) + " M.-%"

Bereich("A8").Wert = Bereich("A8").Wert + " " + ZuZnF(anteilflug) + " M.-%"

Bereich("A9").Wert = Bereich("A9").Wert + " " + alter + " Tage"

Bereich("D4").Wert = Bereich("D4").Wert + " " + umtemp + " °C"

Bereich("D5").Wert = Bereich("D5").Wert + " " + umfeuchte + " %"

Bereich("D6").Wert = Bereich("D6").Wert + " " + Niederschlag

Bereich("D8").Wert = Bereich("D8").Wert + " " + Datumm

Bereich("D9").Wert = Bereich("D9").Wert + " " + Uhrzeit

Bereich("B14").Wert = ti(1)

Bereich("B15").Wert = ti(2)

Bereich("B16").Wert = ti(3)

Bereich("B17").Wert = ti(4)

Bereich("B18").Wert = ti(5)
 Bereich("B19").Wert = ti(6)
 Bereich("B20").Wert = ti(7)
 Bereich("B21").Wert = ti(8)

Bereich("C14").Wert = wi(1)
 Bereich("C15").Wert = wi(2)
 Bereich("C16").Wert = wi(3)
 Bereich("C17").Wert = wi(4)
 Bereich("C18").Wert = wi(5)
 Bereich("C19").Wert = wi(6)
 Bereich("C20").Wert = wi(7)
 Bereich("C21").Wert = wi(8)

b = 2900

konstante = Exp(b * (1 / 293 - 1 / (273 + umtemp)))

konstante2 = (128 - anteilhuettenflug) * (wdurchz - 0,03) / 11,4

i = 8

Solange (i > 1) Und (Nicht IstZahl(ti(i)) Und (Nicht IstZahl(wi(i))))

 i = i - 1

EndeSolange

wieviele = i

Für i = 1 Bis wieviele

 d(i) = wi(i) * konstante

 e(i) = Newton.Newton(ti(i); d(i))

 f(i) = e(i) + (100 - e(i)) * 1 / (1 + alter / (ti(i) ^ 0,85 * konstante2))

Nächste i

sp = 4

zc = 13

Für i = 1 Bis wieviele

 Bereich(ZelleListe(zc + i; sp + 0); ZelleListe(zc + i; sp + 0)).Wert = d(i)

 Bereich(ZelleListe(zc + i; sp + 1); ZelleListe(zc + i; sp + 1)).Wert = c(i)

 Bereich(ZelleListe(zc + i; sp + 2); ZelleListe(zc + i; sp + 2)).Wert = f(i)

Nächste i

Bereich("a2").Wert = Bereich("a2").Wert + tabellentitel

Bereich("a45").Wert = Bereich("a45").Wert + bildtitel

Bereich("a2").Auswählen

doppel = InZnF(AktiveZelle.Wert; ":")

len = Länge(AktiveZelle.Wert)

Mit AktiveZelle.Zeichen(Start:=1; Länge:=doppel).Schriftart

 .Name = "Times New Roman"

 .Schriftstil = "Standard"

 .Grösse = 12

 .Durchstreichen = Falsch

 .Hochgestellt = Falsch

```
.Tiefgestellt = Falsch
.Kontur = Falsch
.Schatten = Falsch
.Unterstreichen = xlEinfach
.FarbIndex = xlAutomatisch
Ende Mit
Mit AktiveZelle.Zeichen(Start:=doppel + 1; Länge:=len).Schriftart
.Name = "Times New Roman"
.Schriftstil = "Standard"
.Grösse = 12
.Durchstreichen = Falsch
.Hochgestellt = Falsch
.Tiefgestellt = Falsch
.Kontur = Falsch
.Schatten = Falsch
.Unterstreichen = xlKein
.FarbIndex = xlAutomatisch
Ende Mit
Bereich("A26").Wert = 40
Bereich("A27").Wert = 50
Bereich("B26").Wert = umfeuchte
Bereich("B27").Wert = umfeuchte
Bereich("B25").Wert = "r.F. " + ZuZnF(umfeuchte) + "%"

Bereich("a45").Auswählen
doppel = InZnF(AktiveZelle.Wert; ":")
len = Länge(AktiveZelle.Wert)
Mit AktiveZelle.Zeichen(Start:=1; Länge:=doppel).Schriftart
.Name = "Times New Roman"
.Schriftstil = "Standard"
.Grösse = 12
.Durchstreichen = Falsch
.Hochgestellt = Falsch
.Tiefgestellt = Falsch
.Kontur = Falsch
.Schatten = Falsch
.Unterstreichen = xlEinfach
.FarbIndex = xlAutomatisch
Ende Mit
Mit AktiveZelle.Zeichen(Start:=doppel + 1; Länge:=len).Schriftart
.Name = "Times New Roman"
.Schriftstil = "Standard"
.Grösse = 12
.Durchstreichen = Falsch
.Hochgestellt = Falsch
.Tiefgestellt = Falsch
.Kontur = Falsch
```

```
.Schatten = Falsch
.Unterstreichen = xlKein
.FarbIndex = xlAutomatisch
Ende Mit
Für i = wieviele + 1 Bis 8
    ZeileListe(wieviele + 14).Auswählen
    Auswahl.Löschen Verschieben:=xlNachOben
Nächste i
Anwendung.BildschirmAktualisierung = Wahr
Gespeichert = False
Durchlaufe
    zuspeicherndedatei = Anwendung.SpeichernUnterErmitteln _
        (dateiname; dateifilter:="Excel-Files (*.XLS), " + dateiname)
    Wenn zuspeicherndedatei <> Falsch Dann
        Bei Fehler Weiter Nächste
        AktiveArbeitsmappe.SpeichernUnter (zuspicherndedatei)
        Wenn AktiveArbeitsmappe.Gespeichert = Falsch Dann
            Gespeichert = Falsch
        Sonst
            Gespeichert = Wahr
            AktiveArbeitsmappe.Gespeichert = Wahr
        Ende Wenn
    Sonst
        Gespeichert = Wahr
        AktiveArbeitsmappe.Gespeichert = Wahr
        AktiveArbeitsmappe.Schliessen
    Ende Wenn
Schleife BisWahr Gespeichert
Sonst
    FensterListe(feuchtedatei).Aktivieren
    Gespeichert = Wahr
    AktiveArbeitsmappe.Gespeichert = Wahr
    AktiveArbeitsmappe.Schliessen
Ende Wenn ' Dialogblatt
Keinelustmehr = MeldungsDlg(" Weiter ?"; vbJaNein)
Schleife BisWahr Keinelustmehr = vbNein

FensterListe(makrodatei).Aktivieren
AktiveArbeitsmappe.Speichern
AktiveArbeitsmappe.Schliessen

Ende Sub
```

5.3.5.2 Iterationsprogramm nach Newton-Verfahren

Öffentlich a_1; a_2; a_3; a_4; a_5; a_6; a_7

Öffentlich Funktion Newton(tiefe_loc; ohm_loc)

Anwendung.BildschirmAktualisierung = Falsch

Wenn (tiefe_loc = 0) Dann

 Newton = -1

 Verlasse Funktion

Ende Wenn

Wenn (ohm_loc = 0) Dann

 Newton = -1

 Verlasse Funktion

Ende Wenn

Rufe Funktionskonstanten(tiefe_loc; ohm_loc)

eps = 0,000001

fxn = 1000

xn = 65

xn1 = eps

hundert = feuchtefunktion(100) + a_7

Solange (Abs(fxn) > eps)

 xn1 = xn

 fxn = feuchtefunktion(xn)

 Wenn (fsxn = -1) Dann

 Newton = -1

 Verlasse Funktion

 Ende Wenn

 fsxn = dfdxfeuchtefunktion(xn)

 xn = xn1 - fxn / fsxn

 =MELDUNG(WAHR;TEXT(tiefe_loc;"00000.00000"))

 =ABS(fxn)

EndeSolange

Newton = xn

Ende Funktion

Sub Funktionskonstanten(tiefe_loc; ohm_loc)

a_1 = -5,33 * 0,01

a_2 = 5,53

a_3 = 0,000000000001

a_4 = 5,13

a_5 = 322,36

a_6 = tiefe_loc

a_7 = ohm_loc

Ende Sub

Funktion feuchtefunktion(x)

d = delta

B42 = (a_1 * x + a_2) * d

B43 = (a_3 * x ^ a_4) * d

B44 = (Exp(a_5 / x) / a_6) * d

B45 = B42 + B43 * Exp(B44)

B46 = B45 * 1000 - a_7

feuchtefunktion = B46

Ende Funktion

Funktion dfdxfeuchtefunktion(x)

d = delta

B55 = (Exp(a_5 / x) / a_6) * d

B56 = a_1 * d + a_3 * d * a_4 * x ^ (a_4 - 1) * Exp(B55)

B57 = (-a_5 / x ^ 2) * d * Exp(a_5 / x) / a_6 * Exp(B55)

B58 = (B56 + d * a_3 * x ^ a_4 * B57) * 1000

dfdxfeuchtefunktion = B58

Ende Funktion

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Meßverfahren mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden so zu kalibrieren, daß den mit diesem Sensor gemessenen zeit- und tiefenabhängigen Widerständen unmittelbar Betonfeuchtigkeitsgehalte zugeordnet werden können.

Hierzu war es zunächst erforderlich einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem ermittelten Elektrolytwiderstandsprofil eines Betons und einer äquivalenten Umgebungsfeuchte (RH_A) herzustellen. Diese äquivalente Umgebungsfeuchte entspricht einer konstanten Umgebungsfeuchte, bei der sich im Zustand der Gleichgewichtsfeuchte (Definition s. Abschnitt 3.2) der gemessene Widerstand in der zugehörigen Tiefe einstellt. Der in Abschnitt 4.3 beschriebene funktionale Zusammenhang zwischen dem Elektrolytwiderstand des Betons und der Umgebungsfeuchte beruht auf einer statistischen Auswertung von Meßergebnissen. Die Genauigkeit, mit der sich die gemessenen Widerstände annähern ließen, bestätigte die Tauglichkeit des gewählten Ansatzes (gemäß Gleichung (6)).

In Kenntnis dieses funktionalen Zusammenhangs zwischen Elektrolytwiderstand und Umgebungsfeuchte konnte im folgenden - unter Ausnutzung bekannter Ansätze zur Bestimmung der Feuchteverteilung - ein Berechnungsmodell erstellt werden, das den gemessenen Elektrolytwiderständen (input-data) die zugehörigen Feuchteverteilungen (output-data) zuordnet.

Das erstellte Berechnungsmodell wurde abschließend in ein computertaugliches Programm umgesetzt.

Zur weiteren Überprüfung des Berechnungsmodells ist es sinnvoll, die folgenden Punkte weiter zu verfolgen:

- Streuungen:

Zur Abschätzung des Einflusses der Streuungen innerhalb gleicher Mischungszusammensetzung sollte die Anzahl von Prüfkörpern gleicher Herstellung erhöht werden.

- Umgebungsfeuchtigkeit:

Das Berechnungsmodell stützt sich bisher auf Meßwterergebnisse von Umgebungsfeuchten von 70, 80 und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Stichpunktartige Kontrollen zu weiteren Umgebungsfeuchten (beispielsweise 75, 85, 90 und/oder 95 % r. F.) könnten den gewählten Berechnungsansatz bestätigen bzw. korrigieren. Darüber hinaus ist es zur Kontrolle der angesetzten Temperaturkorrektur sinnvoll, stichpunktartig äquivalente Umgebungsfeuchten für von 20 °C abweichenden Temperaturen zu bestimmen.

- Betontechnische Parameter:

Bezüglich der betontechnischen Parameter ist die ergänzende Untersuchung weiterer Mischungsvariationen sinnvoll. Insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von Betonzusatzstoffen sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, da in dem bisherigen Ansatz nur konstante Betonzusatzstoffmengen durch den Faktor δ ($\delta = 1,0$ für PZ 35F, $\delta = 1,4$ für HOZ 35L mit 42 M.-% Hüttensandgehalt, $\delta = 1,6$ mit 26 M.-% Flugaschegehalt) berücksichtigt werden konnten. Um den Einfluß unterschiedlicher Hüttensandgehalte oder Flugaschegehalte quantifizieren zu können, müßte in weiteren Untersuchungen ein funktionaler Zusammenhang zwischen Betonzusatzstoffgehalt und der äquivalenten Umgebungsfeuchtigkeit hergestellt werden.

7 LITERATUR

- /1/ Schießl, P. ; Breit, W. ; Souchon, T.: Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. - Forschungsbericht Nr. F 389 = In: Kurzberichte aus der Bauforschung 36 (1995), Nr. 7, S. 317-322
- /2/ Schießl, P. ; Breit, W.: Dauerhaftigkeit örtlicher Instandsetzungen von Schäden durch Bewehrungskorrosion im Stahlbeton. Aachen : Institut für Bauforschung, 1994. - Forschungsbericht Nr. F 332
- /3/ Breit, W. ; Raupach, M.: Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden. In: ibac Kurzberichte 6 (1993), Nr. 41
- /4/ Breit, W.: Bauwerküberwachung mit Hilfe von nachträglich installierten Feuchtesensoren (Multi-Ring-Elektroden). In: ibac Kurzberichte 7 (1994), Nr. 49
- /5/ Schießl, P. ; Breit, W.: Monitoring of the effectiveness of surface protection systems after repair measures using Multi-Ring-Electrodes. Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP, 1995. - In: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, September 26-28, 1995 (Schickert, G. (Ed.)), Vol. 2, S. 1251-1258
- /6/ Schießl, P. ; Breit, W.: Feuchteverteilung in Betonrandzonen. In: Bausanierung 6 (1995), Nr. 2, S. 46-50
- /7/ Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Heft Nr. 433 = Dissertation
- /8/ Catharin, P. ; Federspiel, H.: Der elektrische Widerstand des Betons. In: Elektrotechnik und Maschinenbau 89 (1972), Nr. 10, S. 399-407
- /9/ Monfore, G.E.: The electrical resistivity of concrete. In: Journal of the PCA Research and Development Laboratories 10 (1968), Nr. 2, S. 35-48
- /10/ Weigler, H. ; Karl, S. ; Kupfer, H.: Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau ; Beton : Arten - Herstellung - Eigenschaften. Berlin : Ernst & Sohn, 1989
- /11/ Parrott, L.J.: Moisture profiles in drying concrete. In: Advances in Concrete Research 1 (1988), Nr. 3, S. 164-170
- /12/ Schulte, C. ; Mader, H. ; Wittmann, F.H.: Elektrische Leitfähigkeit des Zementsteins bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt. In: Cement and Concrete Research 8 (1978), Nr. 3, S. 359-368
- /13/ Parrott, L.J.: Factors influencing relative humidity in concrete. In: Magazine of Concrete Research 43 (1991), Nr. 154, S. 45-52; Nr. 157, S. 305-357