

Ueberprüfen des Korrosionsschutzes von Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren

**Contrôle non-déstructive de la protection contre la corrosion des
câbles de précontrainte avec gaine en matière plastique**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion**

**Prof. Dr. B. Elsener
L. Toller, dipl. Ing. ETH
C. H. Vôte, dipl. Ing. ETH
Prof. Dr. H. Böhni**

**Forschungsauftrag AGB 1998/105 (90/98) auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

Ueberprüfen des Korrosionsschutzes von Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren

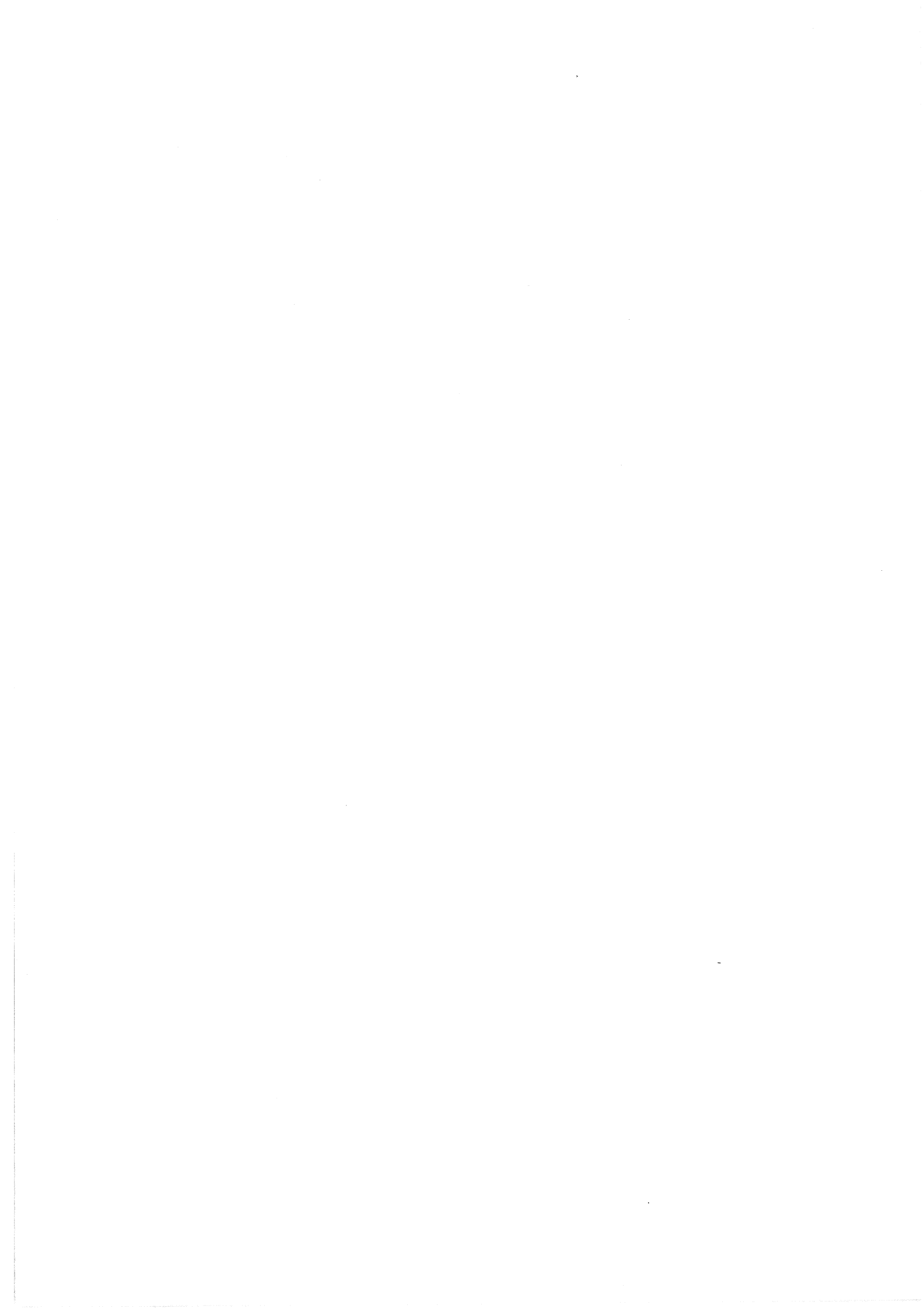
**Contrôle non-déstructive de la protection contre la corrosion des
câbles de précontrainte avec gaine en matière plastique**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion**

**Prof. Dr. B. Elsener
L. Toller, dipl. Ing. ETH
C.H. Vöute, dipl. Ing. ETH
Prof. Dr. H. Böhni**

**Forschungsauftrag AGB 1998/105 (90/98) auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung**

Februar 2002



INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY / RÉSUMÉE	8
1 EINLEITUNG	11
1.1 Hintergrund	11
1.2 Elektrisch isolierte Spannglieder	12
1.2.1 Eigenschaften der Spannbetonbauweise	12
1.2.2 Aufbau der Spannglieder	12
1.2.3 Elektrische Widerstandsmessung	13
1.3 Ziel der Arbeit	15
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	17
2.1 Elektrischer Widerstand und Impedanz	17
2.1.1 Gleichstromwiderstand	17
2.1.2 Impedanzmessung	17
2.2 Serie- und Parallelschaltung von ohmschen mit kapazitiven Widerständen	21
2.2.1 Serieschaltung	21
2.2.2 Parallelschaltung	22
2.2.3 Serie- und Parallelschaltung von Kapazitäten	23
2.3 Betonwiderstand	23
2.3.1 Einfluss der Temperatur	23
2.3.2 Einfluss der Hydratation	24
2.3.3 Dielektrische Eigenschaften	25
2.4 Elektrischer Widerstand von Kunststoffhüllrohren und darin enthaltenen Fehlstellen	25
2.4.1 Kapazitiver Widerstand des intakten Hüllrohrs	25
2.4.2 Widerstand von Fehlstellen	26
3 EXPERIMENTELLES	29
3.1 Betonprobekörper	29
3.1.1 Beschreibung der Probekörper	29
3.1.2 Herstellung	33
3.1.3 Versuche	33
3.2 Probekörper in Lösung	37
3.2.1 Beschreibung der Probekörper	37
3.2.2 Versuche	39

3.3	Messtechnik	41
3.3.1	2-Punkt-Messung	41
3.3.2	4-Punkt-Messung	41
3.3.3	Messgeräte	42
3.4	Pilotobjekte	45
3.4.1	P.S. du Milieu	45
3.4.2	Burg Aderahubel	46
3.3.3	Pré du Mariage	46
4	RESULTATE	47
4.1	Betonprobekörper	47
4.1.1	Ohmscher Widerstand im Ausgangszustand	47
4.1.2	Zeitlicher Verlauf des Widerstands	48
4.1.3	Messung bei verschiedenen Frequenzen	51
4.1.4	Messung mit verschiedenen Geräten	53
4.1.5	Verlustfaktor und Kapazität	54
4.1.6	Temperatur	55
4.1.7	Betonwiderstand	56
4.1.8	Lokale Befeuchtung	58
4.2	Versuche in Lösung	59
4.2.1	Messwerte bei verschiedener Lochgrösse und -anzahl	59
4.2.2	Abstand des Netzes zur Fehlstelle	60
4.3	Messungen an Pilotobjekten	61
4.3.1	P.S. du Milieu	61
4.3.2	Brücke Burg-Aderahubel	62
4.3.3	P.S. Pré du Mariage	63
5	DISKUSSION	65
5.1	Hydratation und Austrocknung des Betons und Wasseraufnahme des Hüllrohrs	65
5.2	Einfluss der Temperatur	67
5.3	Einfluss der Fehlstellen	69
5.4	Messgeräte und -frequenz	70
5.4.1	Impedanzmessanlage Zahner IM6	70
5.4.2	Erdungsmessgerät Unilap Geo	70
5.4.3	LCR-Meter Escort ELC-131 D	70

5.5	Verschiedene Anzahl Löcher und Hüllrohrängen	73
5.5.1	Gleiche Hüllrohrlänge und verschiedene Anzahl Löcher	73
5.5.2	Gleiche Anzahl Löcher und verschiedene Hüllrohrlänge	74
5.5.3	Gleiche Anzahl Löcher pro Hüllrohrlänge	75
5.6	Vergleich der Probekörper in Beton und in Lösung	76
5.7	Modell für den elektrischen Widerstand von Kunststoffhüllrohren	78
5.7.1	Annahmen	78
5.7.2	Modell	78
5.7.3	Vergleich der gemessenen und gerechneten Werte	82
5.7.4	Berechneter Widerstand für ein 100 m langes Spannglied	85
5.8	Zusammenfassung der Diskussion	89
6	GRENZWERTE FÜR DIE RICHTLINIEASTRA / SBB	91
6.1	Grenzwert für den Widerstand	91
6.2	Grenzwert für den Verlustfaktor	92
6.3	Kapazitäten	92
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	93
	LITERATURVERZEICHNIS	94

ZUSAMMENFASSUNG

Spannglieder im Verbund leisten einen ausschlaggebenden Beitrag zur Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken, insbesondere Strassen- und Eisenbahnbrücken. Ueber konstruktive Schwachstellen (Fahrbahnübergänge, Entwässerungen etc.) kann das korrosionsauslösende, tausalzhaltige Wasser zum Spannglied gelangen und - wie verschiedene Schadenfälle auch in der Schweiz zeigten - das Metallhüllrohr und den Spannstahl angreifen. Weiter existieren keine zerstörungsfreien Prüfverfahren, welche Informationen zum Korrosionsschutz der Spannglieder liefern können.

Seit einiger Zeit bietet der Markt daher Spannsysteme mit verbessertem Korrosionsschutz an (Kunststoffhüllrohre und elektrisch isolierte Spannglieder). Diese neuen Spannsysteme zeigen ein verbessertes Ermüdungsverhalten, sie erlauben aber insbesondere eine einfache, zerstörungsfreie Ueberwachung des Korrosionsschutzes der Spannglieder mittels der „elektrischen Widerstandsmessung“. Seit 1993 wurden solche elektrisch isolierte Spannglieder an verschiedenen Brückenobjekten eingesetzt; eine Richtlinie „Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten“ des Bundesamt für Strassen und der SBB liegt seit kurzem vor. Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war eine klare theoretische und experimentelle Abstützung des in der Richtlinie verwendeten Grenzwert des elektrischen Widerstands mittels Labormessungen an Kunststoffhüllrohren mit definierten Verletzungen, theoretischer Modellierung und der Interpretation von Messungen an Pilotobjekten.

Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass wegen der speziellen Geometrie der Spannglieder in Brücken (sehr lange Parallelführung zur schlaffen Bewehrung) nur Impedanzmessungen, welche eine Differenzierung und getrennte Erfassung von kapazitivem Hüllrohrwiderstand und ohmschem Widerstand der Verletzungen ermöglichen, zum Ziele führen. Im weitem konnte gezeigt werden, dass der ohmsche Widerstand des Hüllrohrs proportional zur Länge ab- und die Kapazität entsprechend zunimmt. Als längenunabhängige Grösse wurde der Verlustfaktor D (Quotient von ohmschem / kapazitivem Widerstand) eingeführt.

Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen für die Anwendung der „elektrischen Widerstandsmessung“ zur Ueberprüfung von elektrisch isolierten Spanngliedern in Kunststoffhüllrohren:

- Die Messungen können nur mit LCR Metern ausgeführt werden, reine Erdungsmessgeräte sind nicht tauglich.
- Als Grenzwert für die intakte Dichtigkeit des Hüllrohrs und damit Isolation des Spannstahls muss ein vom Durchmesser abhängiger spezifischer Wert definiert werden, aus den Messungen resultierte z.B. $500 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ für Hüllrohre mit 59 mm
- Der Verlustfaktor D für ein intaktes Hüllrohr beträgt $D = 0.023$, ein Messwert bis $D \leq 0.1$ kann angesichts von systembedingten kleinen Lecks als gut betrachtet werden.

Der ohmsche Widerstand zwischen Spannglied und schlaffer Bewehrung steigt aufgrund der Hydratation und der Austrocknung des Injektionsguts und des Betons mit der Zeit asymptotisch an. Ein Abfall des Widerstands erlaubt eindeutig, das Eindringen von Wasser und Feuchtigkeit an einer Verletzung des Hüllrohrs zu detektieren - damit ist die zerstörungsfreie Ueberwachung des Korrosionsschutzes des Spannstahls gegeben.

SUMMARY

Internal bonded post-tensioned tendons contribute decisively to the serviceability, safety and durability of prestressed concrete structures, especially road and railway bridges. At "weak points" of the construction such as expansion joints, drainage systems etc. chloride containing water can reach the tendon and - as demonstrated by several damages in Switzerland - the metallic duct and the prestressing steel start to corrode. Further there exists no established non-destructive technique that is able to obtain reliable information on the corrosion protection of the prestressing steel.

Since several years new post-tensioning systems with improved corrosion protection, corrugated plastic ducts and electrically isolated tendons, are on the market. These new systems show improved fatigue resistance and they allow a simple, non-destructive monitoring of the degree of corrosion protection of the prestressing steel with „electrical resistance measurements“. Since 1993 these electrically isolated tendons were installed at several bridges and flyovers in Switzerland. In addition, a guideline „Measures to ensure the durability of post-tensioning tendons in bridges“ of the Swiss Federal Roads Authority and the Swiss Federal Railways has been published. Goal of this research project was to provide reliable, theoretically and experimentally well founded limits of the electrical resistance of tendons used as acceptance criteria in the guideline. Laboratory experiments using plastic ducts with defined defects, theoretical modeling and results obtained at test-structures were combined.

The results of this research have shown that only impedance measurements that allow a separate measurement of the capacitive impedance of the duct and the resistance of the defects can be used on structures where the tendons are for a long distance in parallel to the normal reinforcement. It has been shown that the ohmic resistance decreases and the capacitance increases with the length of the tendons, the loss factor D (division of ohmic by the capacitive impedance) is independent of the length.

The following consequences can be derived for the practical application of the measurements to test and monitor electrically isolated tendons:

- the measurements can be performed only with impedance instruments (LCR meter), simple electrical resistance measurements (e.g. earth meters) are not suitable
- the limiting value for the leak-tightness of the duct and thus for the electrical isolation of the tendons with durable corrosion protection depends on the diameter of the duct and on the length of the tendon. A specific value of $500 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ for a duct with 59 mm has been found.
- The loss factor for a perfectly intact duct was found to be $D = 0.023$, a value of $D \leq 0.1$ can be considered sufficient when taking into account very small leakages

The ohmic resistance measured between the prestressing steel in the tendon and the normal rebar network increases asymptotically with time due to the hydration and drying out of both grout and concrete. A decrease of the ohmic resistance allows to detect in a very early stage the ingress of water at a defect in the duct - thus the non-destructive monitoring of the corrosion protection of the tendons is possible for the first time.

RÉSUMÉE

La plupart des ponts du réseau des routes nationales et principales et une grande partie des ponts du réseau ferroviare ont été construits en béton précontraint, et dans la majorité des cas, en précontrainte avec adhérence. La contribution de ces câbles est déterminante pour la sécurité structurale, pour l'aptitude au service et pour la durabilité de ces ouvrages. L'eau induisant la corrosion accède à l'acier de précontrainte par des points faibles de l'ouvrage: joints de chaussées, revêtement et étanchéité etc. et un certain nombre de dégradations dues à la corrosion sont apparues même en Suisse. De plus, il n'est pas vraiment satisfaisant de ne pouvoir effectuer des contrôles non destructifs sur les câbles de précontrainte avec gaines en acier.

Depuis quelche temps, on trouve sur le marché des dispositifs de précontrainte avec une protection anticorrosion améliorée (gaines en matières synthétiques et câbles isolés électriquement). L'utilisation de gaines en matières synthétiques apporte une amélioration du comportement à la fatigue, mais plus important ces dispositifs rendent possible un contrôle simple et non destructif de la protection contre la corrosion des câbles. Depuis les années 1993 des câbles de précontrainte avec gaines en matière synthétique et isolés électriquement ont été utilisées pour divers ponts routiers. Une directive "Dispositions pour garantir la durabilité des câbles de précontrainte dans les ouvrages d'art" de l'Office fédéral des routes et des CFF a été publiée récemment. L'objectif de la recherche était donc de définir les valeurs limites des mesures d'impédances sur la base des considerations théoriques et des mesures expérimentelles en laboratoire (gaines avec des défauts bien définis) et sur des ponts.

Dans le cadre de ce projet il s'est avéré, que seulement des mesures d'impédance électrique (permettent de distinguer la partie capacitif de la gaine et la partie ohmique des défauts de la gaine) peuvent être appliqués sur des câbles de précontrainte. On a montré aussi que la résistance ohmique diminue et la capacitance augmente avec la longueur du câble. Le facteur de perte D est indépendant de la longueur. Pour l'application des mesures aux câbles de précontrainte isolés sur des ponts on peut formuler les conclusions suivantes:

- les contrôles peuvent être effectués seulement avec des instruments de mesure d'impédance électrique (LCR) et ne pas avec des simples appareils de résistance électrique.
- les valeurs limites pour garantir l'étanchéité et la protection contre la corrosion sont influencées par la longueur du câble et du diamètre de la gaine, comme exemple le valeur limite spécifique pour la gaine avec diamètre 59 mm est $500 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$.
- Le facteur de perte D pour une gaine parfaite a été trouvé de $D = 0.023$, un valeur de $D \leq 0.1$ peut être considéré suffisant pour un câble en pratique.

La résistance ohmique mesurée augmente en manière asymptotique avec l'âge de l'ouvrage due à l'hydratation et au dessèchement du béton et du coulis. Une diminution continue des valeurs indique l'infiltration de l'eau (et des chlorures) à travers un défaut de la gaine. Ces mesures permettent donc pour la première fois un contrôle non-destructif de la protection contre la corrosion des câbles et un avertissement en dû temps.

1 EINLEITUNG

1.1 HINTERGRUND

Die ersten vorgespannten Tragwerke wurden vor über 60 Jahren erstellt. Nach dem 2. Weltkrieg erlebte die Vorspanntechnik einen starken Aufschwung, und dank den technischen Vorzügen und der Wirtschaftlichkeit wurden immer mehr Brückenbauten in Spannbeton erstellt. Auch in der Schweiz hat sich diese Bauweise durchgesetzt, die meisten Brücken des National und Hauptstrassennetzes und eine beachtliche Anzahl von Eisenbahnbrücken sind in der Spannbetonweise erstellt worden.

Trotz der insgesamt bewährten Spannbetonbauweise treten mit zunehmendem Alter der Brücken vermehrt Korrosionsschäden an den Spannstählen auf, was – wenn nicht rechtzeitig entdeckt – zu Tragsicherheitsproblemen führen kann. Der Korrosionsschutz muss vor allem bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund dauerhaft sein, da die Spannglieder selbst im Falle von Korrosion nicht einfach ausgewechselt werden können. In diesem Zusammenhang ist es unbefriedigend, dass keine etablierte Methode für die zerstörungsfreie Überwachung der Spannglieder existiert. Labor- und in der Folge Feldversuche an Pilotobjekten im Rahmen eines ASTRA Forschungsprojektes [1] zeigten eindeutig, dass die Reflektometrische Impulsspektroskopie zur zerstörungsfreien Prüfung injizierter Spannglieder nicht angewandt werden kann. Andere zerstörungsfreie Prüfmethode führten bis heute ebenfalls nicht zum Erfolg [2,3]. Damit bleibt der Korrosions- und Injektionszustand der Spannglieder weiterhin schwer überprüfbar.

An einer Verbesserung sowohl des Korrosionsschutzes als auch der Ueberprüfbarkeit wurde in jüngster Zeit auf verschiedenen Ebenen intensiv gearbeitet:

- Seit mehreren Jahren bietet die Industrie Spannsysteme mit verbessertem Korrosionsschutz an (Kunststoffhüllrohre und elektrisch isolierte Spannglieder), welche auch die prinzipiellen technologischen Voraussetzungen für eine zerstörungsfreie Prüfung erfüllen, nämlich die elektrische Isolation und ein elektrischer Anschluss an das Spannglied.
- An verschiedenen Pilotobjekten wurde seit 1993 sowohl der Einbau als auch die Ueberwachung der Spannglieder mit elektrischer Widerstandsmessung in der Praxis durchgespielt, was bereits zu Verbesserungen bei den Systemen führte.
- Im Auftrag des ASTRA und der SBB wurde eine Richtlinie „Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten“ erarbeitet, welche in Ergänzung zur Norm SIA 162 die Anforderungen an den Korrosionsschutz und die Ueberwachbarkeit bei Spannsystemen im Brückenbau festhält. Die Forschungsarbeit soll die Grenzwerte für den ohmschen Widerstand theoretisch noch experimentell absichern, denn verschiedene Einflüsse wie z.B. die Länge des Spannglieds, Spannglied-typ etc. waren vor Abschluss dieser Arbeit noch nicht bekannt.

1.2 ELEKTRISCH ISOLIERTE SPANNGLIEDER

1.2.1 Eigenschaften der Spannbetonbauweise

Die Funktion der Spannglieder besteht in der Aufnahme von Zugkräften, da der Beton allein diese nicht aufnehmen kann. Im Gegensatz zur Armierung, die zur gleichen Aufgabe dient, werden die Spannglieder nach dem Erhärten des Betons und vor der Übertragung der Belastung gespannt, d.h. ihnen wird eine Zugkraft aufgeprägt, die wegen des Kräftegleichgewichts eine entgegengesetzt grosse Druckkraft im Beton erzeugt. Die drei wichtigsten Auswirkungen der Vorspannung sind:

- Durch die erzeugte Druckkraft bleibt der Beton bei Belastung länger im ungerissenen Bereich
- Die grosse Dehnung des hochwertigen Stahls wird vorweggenommen
- Durch Anordnen einer entsprechenden Kabelgeometrie werden Kräfte erzeugt, die den Hauptlasten entgegen wirken

Aufgrund dieser Eigenschaften weist die Spannbetonbauweise folgende Vorteile gegenüber der Stahlbetonbauweise auf:

- Die Tragfähigkeit wird erhöht, dadurch können bei gegebener Konstruktionshöhe grössere Lasten aufgenommen werden oder bei freier Konstruktionshöhe schlanker gebaut werden
- Risse können ganz verhindert (volle Vorspannung) oder stark eingeschränkt werden (teilweise Vorspannung)
- Durchbiegungen unter den Einwirkungen des Gebrauchszustands lassen sich durch Vorspannung stark reduzieren

Diese Vorteile werden durch Einbau von Spanngliedern vor allem im Brückenbau und im Hochbau (Bodenplatten, Decken, Träger) ausgenutzt.

In der Schweiz wird mehrheitlich die sogenannte nachgespannte Vorspannung mit Verbund (posttensioning) verwendet. Andere Arten, wie Vorspannung im Spannbett (pretensioning, angewandt vor allem im Hochbau), Vorspannung ohne Verbund, externe Spannglieder und Schrägseile sind weniger häufig.

1.2.2 Aufbau der Spannglieder

Spannglieder mit nachträglichem Verbund werden häufig für Längs- und Quervorspannung in Brückenträgern oder -platten eingesetzt; deren Einzelteile sind in Abb. 1.1 dargestellt. Neben einer festen braucht es eine bewegliche Verankerung, evtl. Kupplungen. Die Spannstähe (Drähte, Litzen, Stangen) werden in ein Hüllrohr aus Metall oder Kunststoff eingezogen und nach dem Spannen injiziert.

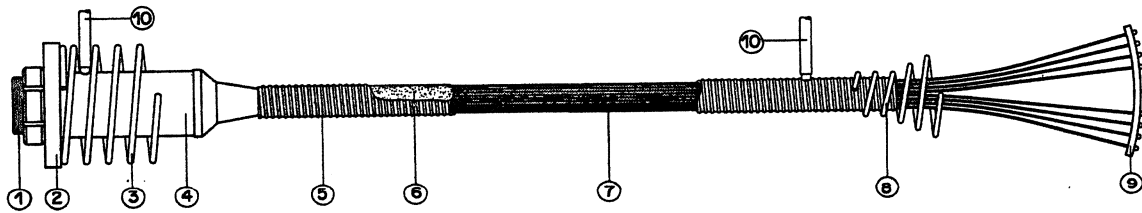


Abb. 1.1: Aufbau eines Spannglieds:

- | | | | |
|---|-----------------------|----|--------------------------------|
| 1 | Beweglicher Ankerkopf | 6 | Injektionsmörtel |
| 2 | Ankerplatte | 7 | Draht- oder Litzenbündel |
| 3 | Spirale | 8 | Spirale |
| 4 | Trompete | 9 | Feste Ankerplatte |
| 5 | Hüllrohr | 10 | Einpress- / Entlüftungsöffnung |

Für den Korrosionsschutz der Draht- oder Litzenbündel sind vor allem zwei Bestandteile des Spannglieds von Bedeutung: das Hüllrohr und das Injektionsgut.

- Hüllrohr

Die Vorspannung mit nachträglichem Verbund bedarf für die Dehnung des Spannglieds einen längsorientierten Hohlraum, welcher in der Praxis durch ein biegsames Rohr erzeugt wird. Dieses Hüllrohr erfüllt bei der heute gebräuchlichen Anlieferung des fertig konfektionierten Spannglieds auf die Baustelle auch die Funktion eines Transportschutzes. Als Werkstoff für Metallhüllrohre steht Bandstahl mit Dicken von 0.25 bis etwa 0.35 mm im Einsatz. Bei den hier im Blickpunkt stehenden elektrisch isolierten Spanngliedern besteht das Hüllrohr aus Kunststoff. Dabei werden heute vorwiegend solche aus Polypropylen (PP) oder Polyäthylen (PE) verwendet. Der Gebrauch von Hüllrohren aus Polyvinylchlorid (PVC) war in der Vergangenheit auf Spezialfälle beschränkt und ist heute praktisch nicht mehr anzutreffen. Neben der elektrischen Isolation weisen Kunststoffhüllrohre noch weitere Vorteile auf: Der Reibungsbeiwert ist viel geringer und das Ermüdungsverhalten ist besser.

- Injektionsgut

Das Injektionsgut besteht normalerweise aus Portlandzement, Wasser und einem Zusatzmittel zur Reduktion der Wasserausscheidung und zur Erhöhung der Fließfähigkeit. Die Aufgaben des Injektionsguts sind die Herstellung des Verbundes zwischen dem Spannstahl und dem Hüllrohr sowie die Sicherstellung eines ausreichenden Korrosionsschutzes. Der Schutz vor Korrosion basiert auf der Bildung einer stabilen Passivschicht auf dem Spannstahl durch das alkalische Milieu des Injektionsguts.

1.2.3 Elektrische Widerstandsmessung

Mit der elektrischen Widerstandsmessung wird der Korrosionsschutz des Spannglieds (d.h. seine Dichtigkeit) während der Bauzeit und während der Gebrauchsdauer überprüft. Der grösste Teil der Korrosionsschäden an Spannstählen entsteht durch die Verwendung von Streusalzen im Winterdienst. Die Chloride dringen mit dem Wasser in den Beton ein und erreichen, falls ein undichtes Hüllrohr vorliegt, den Spannstahl. Auf dessen Oberfläche entstehen in Folge lokale Korrosionsangriffe. Zudem kann in den gebildeten Löcher und Narben

atomarer Wasserstoff gebildet werden (Korrosion nach dem H_2 -Typ), der ins Metall diffundieren und dort versprödet wirken kann. Falls der Spannstahl durch eine Fehlstelle im Hüllrohr direkten Kontakt mit der Bauwerksbewehrung aufweist, kann die lokale Korrosion durch Makroelementbildung mit der Bauwerksbewehrung beschleunigt werden.

Die Korrosion des Spannstahls kann also ausgeschlossen werden, wenn das Hüllrohr keine Fehlstellen aufweist und kein elektrischer Kontakt zwischen dem Spannstahl und der umliegenden Bewehrung besteht. Und genau diese Voraussetzung kann mit der elektrischen Widerstandsmessung bei Kunststoffhüllrohren überprüft werden. Weil Kunststoff einen sehr hohen Widerstand aufweist und chloridhaltiges Wasser den Strom gut leitet, erniedrigt sich der Widerstand zwischen Spannstahl und Bauwerksbewehrung bei einem Loch im Hüllrohr, durch das chloridhaltiges Wasser eindringt.

Neben der Verwendung von Kunststoffhüllrohren muss bei elektrisch isolierten Spanngliedern auch der Verankerungsbereich durch konstruktive Massnahmen (Isolationsplatte) vollständig von der umliegende Bewehrung isoliert werden. Zudem ist auf dichte Hüllrohrverbindungen und dauerhaft verschlossene Injektionsanschlüsse zu achten. Die Spanngliedern werden durch eine Schutzhaube dicht abgeschlossen. Für die Widerstandsmessungen sind elektrische Anschlüsse an den Spannstahl und an die Bewehrung vorzusehen.

Neben den eigentlichen zu detektierenden Fehlstellen beeinflussen folgende Faktoren die Messwerte:

- Länge und Geometrie des Spannglieds
- Art des Hüllrohrsystems (z.B. geschraubte oder verschweisste Hüllrohrkupplungen)
- Anzahl und Ausgestaltung der Injektionsanschlüsse und Entlüftungsrohre
- Spezifischer Widerstand des Betons und des Zementsteins
- Temperatur

1.3 ZIEL DER ARBEIT

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine bessere theoretische und experimentelle Abstützung des in der oben erwähnten Richtlinie [4] enthaltenen Grenzwerts der elektrischen Widerstandsmessung bei Spanngliedern im Brückenbau zu erreichen. Insbesondere werden die folgenden noch offenen Fragen und Einflussgrößen auf den elektrischen Widerstand zwischen dem Spannstahl und der umliegenden Bewehrung untersucht:

- experimentelle Erfassung des elektrischen Widerstands im Bereich von Hüllrohrkuppungen, Verletzungen etc. für die verschiedenen Systeme
- Vergleich der Messwerte bei verschiedenen Wechselstromfrequenzen (AC) und Gleichstrom (DC)
- theoretische Modellierung und Berechnung des Widerstands des intakten Hüllrohrs sowie von Hüllrohren mit Verletzungen
- Weiterverfolgen und Interpretation der Messdaten an Pilotobjekten

Die Resultate des Forschungsprojekts sollen erlauben, den in der Richtlinie festgesetzten Grenzwert auf eine solide theoretisch und experimentell abgesicherte Basis zu stellen und so den Bauherren, Spannsystemlieferanten, Ingenieuren und Anwendern die notwendige Sicherheit in der Beurteilung der elektrischen Isolation und damit der Korrosionsschutzwirkung der Kunststoffhüllrohre zu geben. Dies ist für die Anwendung dieser neuen Technologie für Qualitätssicherung und Überprüfung von eminenter praktischer Bedeutung.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 ELEKTRISCHER WIDERSTAND UND IMPEDANZ

Die Messung des elektrischen Widerstands kann entweder mit Gleich- oder mit Wechselstrom erfolgen. Die mit diesen zwei unterschiedlichen Stromarten gewonnenen Werte sind nicht identisch, weil die verschiedenen Einflüsse auf den Widerstand sich unterschiedlich auswirken.

2.1.1 Gleichstromwiderstand

Der Messstrom oder die Messspannung ist zeitlich dem Betrage und der Richtung nach konstant. Der elektrische Widerstand wird durch Anwendung des ohmschen Gesetzes ermittelt:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

R = elektrischer Widerstand [Ω]

U = Messspannung oder gemessene Spannung [V]

I = Messstrom oder gemessener Strom [A]

Da der Stromfluss in den Elektroden über Elektronen, im Zementstein jedoch elektrolytisch erfolgt, baut sich beim Anlegen einer Gleichspannung an den Elektroden ein sich zeitlich änderndes Polarisationspotential auf, das die abgelesene Grösse des Widerstands verfälscht. Dieses Problem kann durch die Widerstandsmessung mit Wechselstrom umgangen werden.

2.1.2 Impedanzmessung

Die korrekte Kompensation des sich zeitlich ändernden Polarisationspotentials bei der Widerstandsmessung mit Gleichstrom ist schwierig. Diese Technik ist deshalb im Laufe der Zeit gegenüber der Impedanzmessung, der Bestimmung des elektrischen Widerstands mit einer Wechselspannung, in den Hintergrund getreten. Bei der Impedanzmessung verschwindet das Polarisationspotential, dafür ändern sich die Spannung und der Strom zeitlich und beim Auftreten von Kapazitäten mit einer Phasenverschiebung:

$$\hat{u} = u_S \cos (\omega t + j_1) \quad (2.2)$$

$$\hat{i} = i_S \cos (\omega t + j_2) \quad (2.3)$$

$$j_{(w)} = j_1 - j_2 \quad (2.4)$$

$$Z_{(w)} = u_S / i_S \quad (2.5)$$

Dabei bedeuten:

\hat{u}	= Momentanwert der Spannung	[V]
u_S	= Scheitelwert der Spannung	[V]
w	= Kreisfrequenz	[° s ⁻¹]
t	= Zeit	[s]
$\varphi_{1,2}$	= Phasenlage	[°]
\hat{i}	= Momentanwert des Stroms	[A]
i_S	= Scheitelwert des Stroms	[A]
$\varphi_{(w)}$	= Phasenverschiebung	[°]
$Z_{(w)}$	= Impedanz	[W]

Eine sinusförmige Spannung mit kleiner Amplitude wird angelegt. Die Stromantwort wird gemessen und daraus die Impedanz berechnet. Die Impedanz und die Phasenverschiebung sind von der Frequenz der anregenden Spannung abhängig. Diese Frequenzabhängigkeit kann dazu verwendet werden, Prozesse im Material zwischen den Elektroden oder an den Elektroden selbst zu charakterisieren. Die Impedanz wird dabei über einen ganzen Frequenzbereich gemessen, weshalb diese Technik Impedanz-Spektroskopie genannt wird. Trägt man die Impedanz und die Phasenverschiebung gegen die Frequenz logarithmisch auf, so erhält man ein Bode-Diagramm (Abb. 2.1).

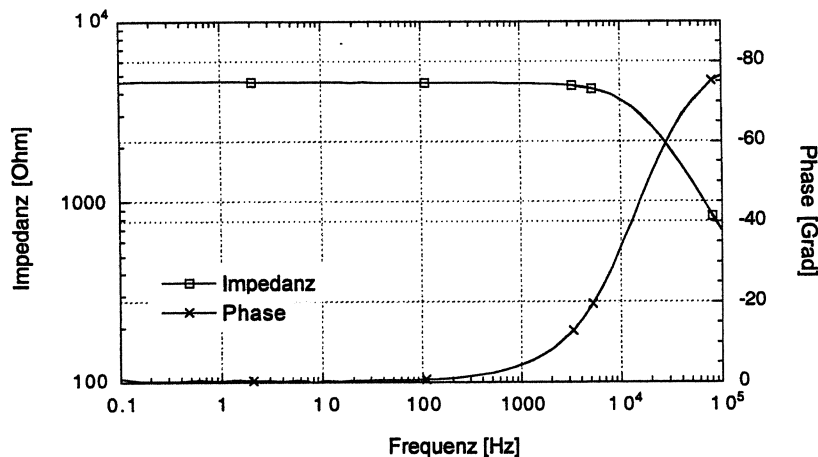


Abb. 2.1: Beispiel eines Bode-Diagramms

Die Impedanz kann jedoch auch in einer komplexen Ebene mit einem Zeiger dargestellt werden. Die Länge des Zeigers entspricht dem Betrag der Impedanz und der Winkel zwischen reeller Achse und Zeiger ist gleich der Phasenverschiebung. Eine solche grafische Darstellung nennt man Zeigerdiagramm (Abb. 2.2).

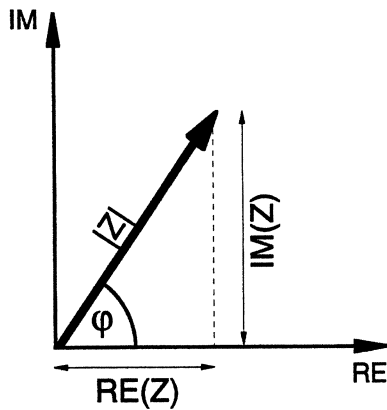


Abb. 2.2: Zeigerdiagramm (Nyquist Diagramm)

Die entsprechenden Größen lassen sich wie folgt berechnen:

$$\text{RE}(Z) = |Z| \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

$$\text{IM}(Z) = |Z| \sin(\varphi) \quad (2.7)$$

$$|Z| = \sqrt{\text{RE}(Z)^2 + \text{IM}(Z)^2} \quad (2.8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{IM}(Z)}{\text{RE}(Z)}\right) \quad (2.9)$$

$\text{RE}(Z)$ = Realteil der Impedanz [Ω]

$\text{IM}(Z)$ = Imaginärteil der Impedanz [Ω]

$|Z|$ = Betrag der Impedanz [Ω]

φ = Phasenverschiebung [$^\circ$]

Die grafische Darstellung von Impedanz-Messdaten in der komplexen Ebene wird Nyquist-Diagramm bezeichnet (Abb. 2.3).

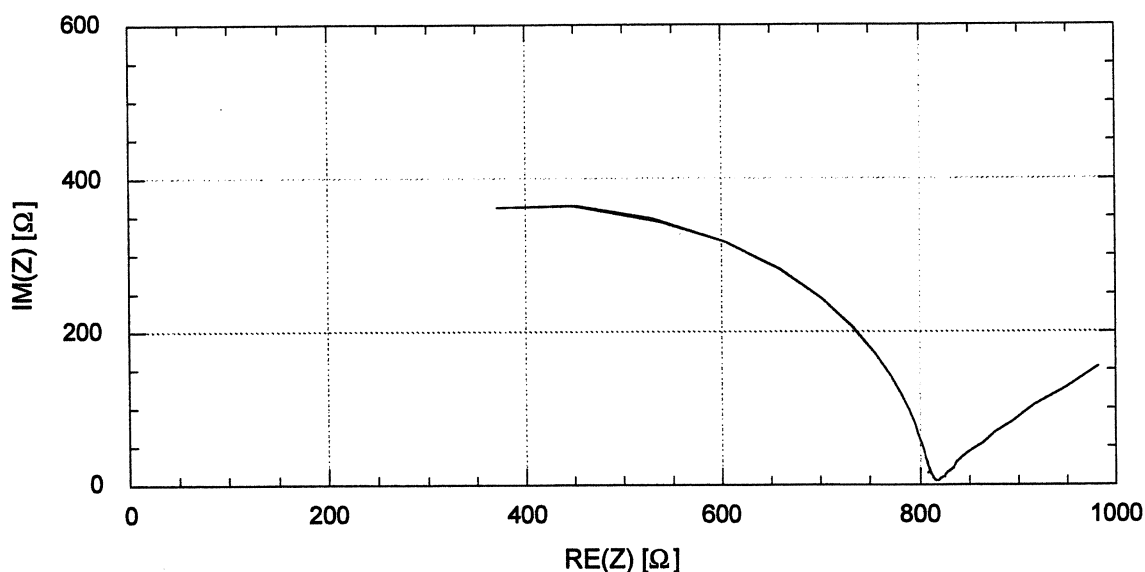


Abb. 2.3: Beispiel eines Nyquist-Diagramms

Ohmscher Widerstand

Bei einem rein ohmschen Widerstand R existiert keine Phasenverschiebung. Somit verschwindet der Imaginärteil und die Impedanz entspricht dem Wert des Widerstands:

$$Z = R \quad (2.10)$$

Z = Impedanz $[\Omega]$

R = Ohmscher Widerstand $[\Omega]$

Der ohmsche Widerstand ist nicht frequenzabhängig, was in der komplexen Darstellung dazu führt, dass alle gemessenen Werte in einem Punkt auf der reellen Achse zusammenfallen.

Kapazitiver Widerstand

Ein Kapazitiver Widerstand verursacht eine Phasenverschiebung von $j = -90^\circ$, d.h. die Stromstärke eilt der Spannung voraus. Dadurch verschwindet der Realteil und der Imaginärteil berechnet sich wie folgt:

$$Z = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C} = -\frac{i}{2\pi f C} \quad (2.11)$$

i = imaginäre Einheit $[-]$

ω = Kreisfrequenz $[^\circ \text{ s}^{-1}]$

C = Kapazität $[\text{F}]$

f = Frequenz $[\text{Hz}]$

Zur Vereinfachung der weiteren Berechnungen und Umformungen wird folgender Ausdruck definiert:

$$Z_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.12)$$

Dadurch vereinfacht sich der Ausdruck der Impedanz zu:

$$Z = -i Z_C \quad (2.13)$$

Verlustfaktor

Der Verlustfaktor D ist durch folgende Gleichung definiert:

$$D = \frac{\text{RE}(Z)}{\text{IM}(Z)} = \frac{1}{\tan \varphi} \quad (2.14)$$

D = Verlustfaktor [-]

Der Verlustfaktor wird für die Beurteilung der Güte von elektronischen Bauteilen gebraucht. Er wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um die Unversehrtheit der Kunststoffhüllrohre zu beurteilen, denn mit zunehmender Anzahl Fehlstellen im Hüllrohr steigt auch der Wert des Verlustfaktors D.

2.2 SERIE- UND PARALLELSCHALTUNG VON OHMSCHEN MIT KAPAZITIVEN WIDERSTÄNDEN

2.2.1 Serieschaltung

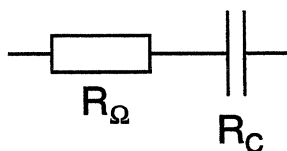


Abb. 2.4: Serieschaltung eines ohmschen und eines kapazitiven Widerstands

Wird ein ohmscher und ein kapazitiver Widerstand gemäss Abb. 2.4 in Serie geschaltet, so ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$Z = R_\Omega + R_C = R_\Omega - i Z_C \quad (2.15)$$

$$\text{RE}(Z) = R_\Omega \quad (2.16)$$

$$\text{IM}(Z) = - Z_C \quad (2.17)$$

$$|Z| = \sqrt{R_{\Omega}^2 + Z_C^2} \quad (2.18)$$

$$D = \frac{\operatorname{RE}(Z)}{\operatorname{IM}(Z)} = -\frac{R_{\Omega}}{Z_C} \quad (2.19)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{D}\right) = \arctan\left(-\frac{Z_C}{R_{\Omega}}\right) \quad (2.20)$$

2.2.2 Parallelschaltung

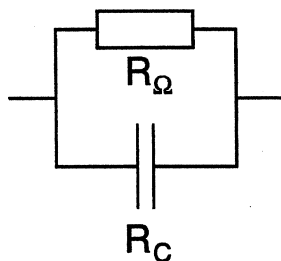


Abb. 2.5: Parallelschaltung eines ohmschen und eines kapazitiven Widerstands

Wird ein ohmscher und ein kapazitiver Widerstand gemäss Abb. 2.5 parallel geschaltet, so ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{\Omega}} + \frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_{\Omega}} + \frac{i}{Z_C} \quad (2.21)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_{\Omega}} + \frac{i}{Z_C}} = \frac{R_{\Omega} Z_C}{Z_C + iR_{\Omega}} = \frac{R_{\Omega} Z_C^2 - i R_{\Omega}^2 Z_C}{Z_C^2 + R_{\Omega}^2} \quad (2.22)$$

$$\operatorname{RE}(Z) = \frac{R_{\Omega} Z_C^2}{Z_C^2 + R_{\Omega}^2} \quad (2.23)$$

$$\operatorname{IM}(Z) = \frac{-R_{\Omega}^2 Z_C}{Z_C^2 + R_{\Omega}^2} \quad (2.24)$$

$$|Z| = \frac{\sqrt{R_{\Omega}^2 Z_C^4 + R_{\Omega}^4 Z_C^2}}{Z_C^2 + R_{\Omega}^2} = \frac{R_{\Omega} Z_C}{\sqrt{Z_C^2 + R_{\Omega}^2}} \quad (2.25)$$

$$D = \frac{\operatorname{RE}(Z)}{\operatorname{IM}(Z)} = -\frac{Z_C}{R_\Omega} \quad (2.26)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{D}\right) = \arctan\left(-\frac{R_\Omega}{Z_C}\right) \quad (2.27)$$

2.2.3 Serie- und Parallelschaltung von Kapazitäten

Für n in Serie geschaltete Kapazitäten gilt:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.28)$$

Die Gesamtkapazität von n parallelgeschalteten Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.29)$$

2.3 BETONWIDERSTAND

Der elektrische Widerstand des Betons ist von folgenden Parametern abhängig: Wassergehalt, Temperatur, Leitfähigkeit der Porenlösung, W/Z-Wert, Zementsteinanteil und Hydratation. Bei zementösen Werkstoffen ist die Porenlösung die einzige leitfähige Phase, während die festen Hydrationsprodukte und die Zuschläge einen hohen spezifischen Widerstand aufweisen.

2.3.1 Einfluss der Temperatur

Für die Umrechnung von Leitfähigkeiten, die bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen werden, wird eine Beziehung verwendet, welche analog zur Gleichung von Arrhenius die Leitfähigkeiten bei verschiedenen Temperaturen über einen exponentiell von der Temperatur abhängigen Korrekturfaktor ineinander überführt [5]:

$$\sigma_{T_1} = \sigma_{T_0} e^{b(T_0^{-1} - T_1^{-1})} \quad (2.30)$$

σ_{T_1}	= Leitfähigkeit der Betons bei der Temperatur T_1	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$ $[K]$
σ_{T_0}	= Leitfähigkeit der Betons bei der Temperatur T_0	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$ $[K]$

b = Exponent [K]

Die Werte für den Exponenten b variieren zwischen 2000 und 3000. Eine starke Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur drückt sich in einem hohen Wert des Exponenten aus. In der Literatur wird für die Temperaturkompensation häufig auf einen mittleren Wert von ungefähr 2400 zurückgegriffen. Dies führt zu einer Korrektur der Werte um ungefähr 3 % pro Grad Celsius im Bereich von 20° Celsius.

Bei Anwendung dieser Gleichung auf den Widerstand ergibt sich:

$$R_{T_1} = R_{T_0} e^{b(T_1^{-1} - T_0^{-1})} \quad (2.31)$$

R_{T_1} =	Widerstand der Betons bei der Temperatur T_1	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$ [K]
R_{T_0} =	Widerstand der Betons bei der Temperatur T_0	$[\Omega^{-1}m^{-1}]$ [K]

2.3.2 Einfluss der Hydratation

Die Hydratation beeinflusst den Widerstand über mehrere Parameter. In der ersten Phase wird die Zusammensetzung der Porenflüssigkeit verändert. In der zweiten Phase nehmen die Zementkörner zur Bildung des Zementsteins noch nach Jahren Wasser auf, was die Menge der Porenlösung als leitende Komponente im Zementstein verändern kann. Durch die mit der Hydratation verbundene Abnahme der Porosität wird die Kapazität der Transportmechanismen in der Porenflüssigkeit zusätzlich eingeschränkt. Polder [6] führt den in Abb. 2.6 gezeigten Anstieg des spezifischen Widerstands auf die Hydratation zurück.

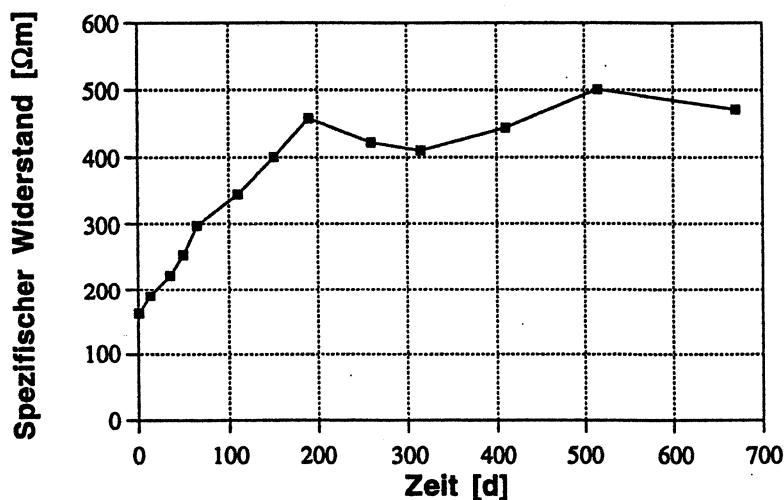


Abb. 2.6: Zunahme des Widerstands von Beton bei 20 °C infolge Hydratation bei Lagerung in einem Klima mit 90 % relativer Luftfeuchtigkeit nach Polder [6]

2.3.3 Dielektrische Eigenschaften

Beim Anlegen einer Wechselspannung mit einer Frequenz von einigen Megahertz verhält sich der zementöse Werkstoff nicht mehr als reiner Widerstand, auch wenn die Elektrodenprozesse bei diesen hohen Frequenzen keinen Beitrag mehr zur Impedanz liefern. Die Ionen in der Porenlösung migrieren, und einige werden an den Porenwänden in ihrer Bewegung behindert. Dieser Vorgang entspricht dem Aufladen eines Kondensators und äussert sich in einer Phasenverschiebung der Stromantwort. Die Migration der Ionen bewirkt einen Stromfluss und kann mit einem ohmschen Widerstand verglichen werden [7].

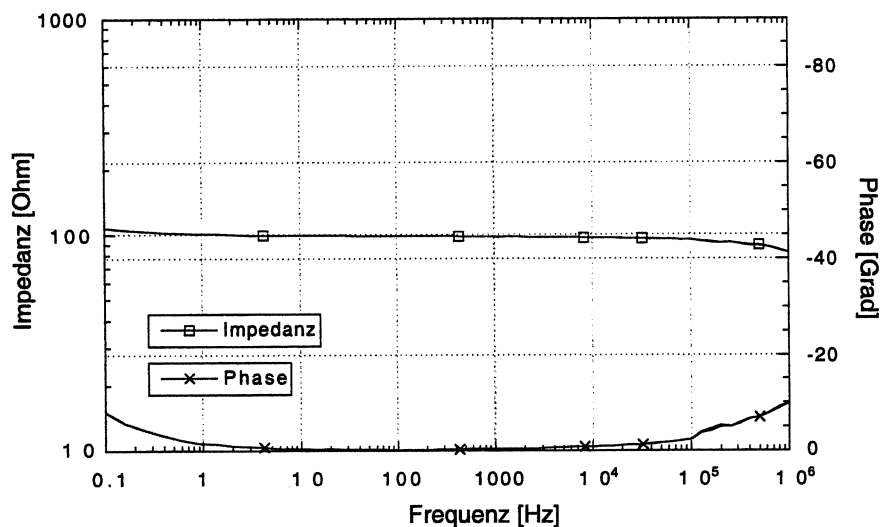


Abb. 2.7: Impedanzspektrum der in dieser Arbeit verwendeten Betonprobekörper

In Abb. 2.7 lässt sich das Ansteigen der Phasenverschiebung ab einer Frequenz von ca. 10 kHz beobachten. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Messgeräte weisen jedoch Messfrequenzen im Bereich von 100 Hz - 1 kHz auf. In diesem Bereich ist die Phasenverschiebung nahezu Null und dadurch der imaginäre Anteil der Impedanz vernachlässigbar. Hierdurch wird festgesetzt, dass für die nachfolgenden Berechnung der Betonwiderstand ein rein ohmscher Widerstand ist.

2.4 ELEKTRISCHER WIDERSTAND VON KUNSTSTOFFHÜLLROHREN UND DARIN ENTHALTENEN FEHLSTELLEN

2.4.1 Kapazitiver Widerstand des intakten Hüllrohrs

Der kapazitive Widerstand eines Kunststoffhüllrohrs lässt sich berechnen, indem das Hüllrohr als zylindrischen Kondensator modelliert und die dazugehörige Gleichung angewendet wird:

$$C = \frac{2\pi l \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (2.32)$$

C	= Kapazität	[F]
l	= Länge des Hüllrohrs	[m]
ϵ_0	= elektrische Feldkonstante = $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{Vm})$	
ϵ_r	= Dielektrizitätszahl	[-]
r_a	= Aussendurchmesser Hüllrohr	[m]
r_i	= Innendurchmesser Hüllrohr	[m]

2.4.2 Widerstand von Fehlstellen

Fehlstellen im Kunststoffhüllrohr (Abb. 2.8) haben einen Widerstand R_F , welcher durch die Geometrie und den spezifischen elektrischen Widerstand des Betons r_B bestimmt wird. Solche Fehlstellen können undichte Kupplungen, nicht sauber abgedichtete Injektions- und Entlüftungsröhrchen oder Verletzungen des Hüllrohrs sein.

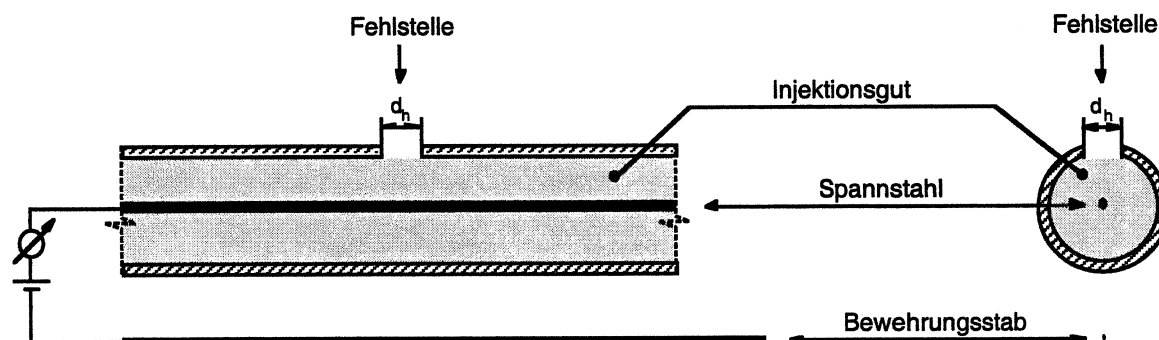


Abb. 2.8: Geometrie an einer Fehlstelle

Für eine kreisförmige Verletzung berechnet sich R_F gemäss [8] zu:

$$R_F = R_L + R_A = \frac{4\rho_B t_d}{\pi d_h^2} + \frac{\rho_B}{\pi d_h} \arctan\left(\frac{2z}{d_h}\right) \quad (2.33)$$

R_F	= Widerstand einer kreisförmigen Verletzung	[Ω]
R_L	= Widerstand des zylindrischen Lochs	[Ω]
R_A	= Ausbreitungswiderstand	[Ω]
ρ_B	= spezifischer elektrischer Widerstand des Betons	[Ωcm]
t_d	= Wandstärke des Hüllrohrs	[cm]
d_h	= Durchmesser der Fehlstelle	[cm]
z	= Abstand Fehlstelle-Bewehrung	[cm]

Auch Fehlstellen, die keine kreisförmige Geometrie aufweisen, werden als zylindrisches Loch mit einem äquivalenten Durchmesser modelliert.

R_L beschreibt den elektrischen Widerstand des zylindrischen Körpers aus Zementstein im Loch des Hüllrohrs, während R_A den Widerstand durch die Ausbreitung vom kreisförmigen Loch in den umgebenden Beton angibt. Für sehr kleine Löcher ist $R_L > R_A$, für grössere Löcher (5 bis 10 mm Durchmesser) weisen beide Werte eine ähnliche Grösse auf.

Der Widerstand einer Fehlstelle R_F wird bestimmt durch den Betonwiderstand ρ_B , der in diesem Fall gemäss Abschnitt 2.3.3 ein ohmscher Widerstand ist. Somit ist auch der Widerstand einer Fehlstelle R_F ein ausschliesslich ohmscher Widerstand.

3 EXPERIMENTELLES

3.1 BETONPROBEKÖRPER

Für die experimentelle Erfassung des elektrischen Widerstands im Bereich verschiedener Fehlstellen wurden 12 Probekörper aus Beton gebaut. Neben dem Referenzprobekörper mit einem durchgehenden und intakten Hüllrohr wurden definierte Fehlstellen erzeugt, Entlüftungsröhrchen angeordnet und verschiedene Kupplungen eingebaut.

3.1.1 Beschreibung der Probekörper

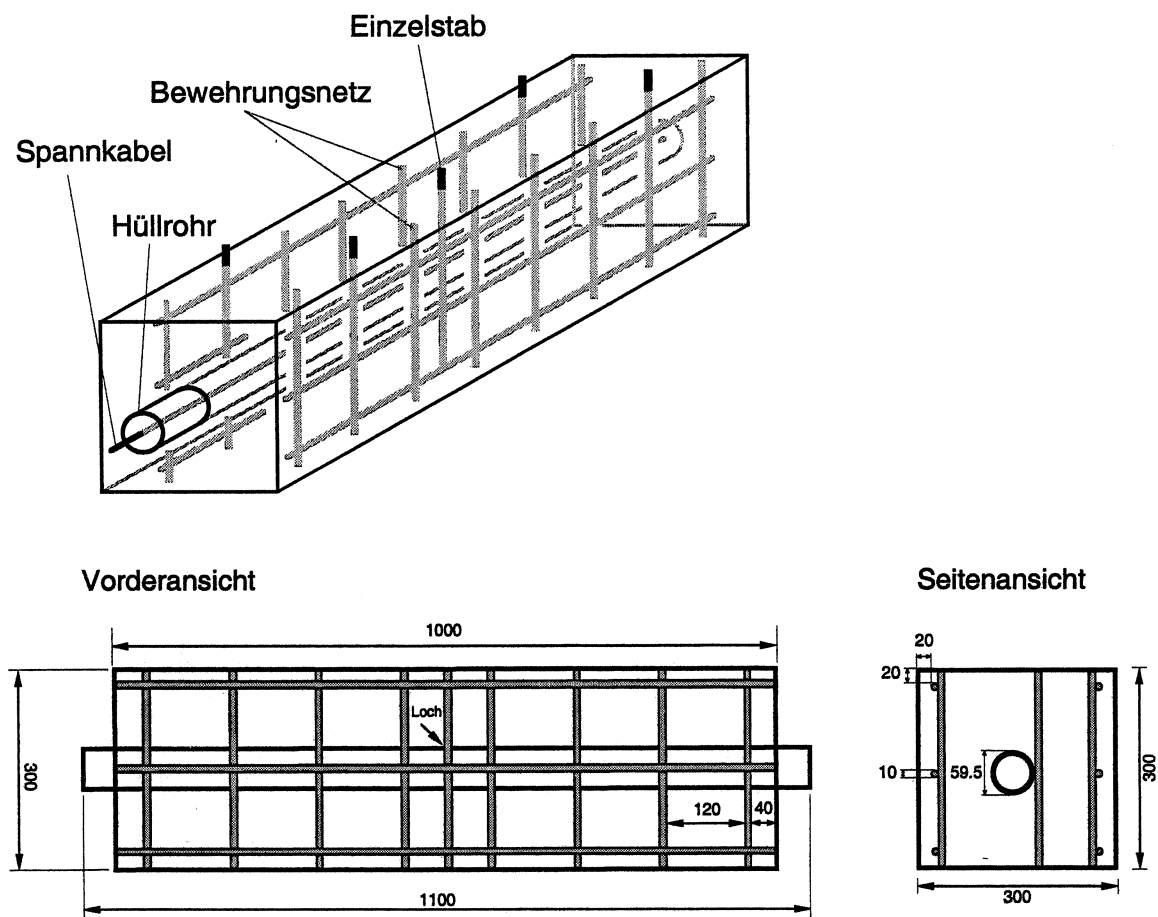


Abb. 3.1: Betonprobekörper (alle Masse in mm)

Die Abmessungen der Betonkörper (Abb. 3.1) betragen 100 x 30 x 30 cm. In der Längsrichtung ist ein Spannglied eingebaut. Das Spannglied besteht aus einem Kunststoffhüllrohr, einem Spannstahl und dem Injektionsgut als Verfüllmaterial. Das Hüllrohr ist gerippt, weist eine Wandstärke von 0.25 cm auf, hat einen Innendurchmesser von 5.9 cm und besteht aus Polypropylen. Als Ersatz für den Spannstahl wurde ein handelsüblicher, ungerippter Bewehrungsstahl mit einem Durchmesser von 14 mm in die Mitte des Hüllrohrs positioniert. Dem Injektionsgut wurde ein Zusatzmittel beigemischt, das ein gleichmässiges Quellen, Vermin-

derung der Wasserabsonderung und ein besseres Fließen bewirkt. Als Modellierung der Bauwerksbewehrung wurden zwei Bewehrungsnetzte angeordnet. Sie bestehen aus handelsüblichen, ungerippten Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 10 mm, die zu einem Netz zusammengeschweisst wurden. Je zwei vertikale Stäbe pro Netz sind etwas länger ausgebildet als die restlichen und ragen so aus dem Beton heraus und dienen als elektrischen Anschluss für die Messgeräte. Zusätzlich zu den Bewehrungsnetzen wurde noch ein einzelner Bewehrungsstab unmittelbar bei den Fehlstellen angeordnet, der auch aus dem Beton herausragt. Dessen Material und Durchmesser ist gleich wie bei den Stäben des Bewehrungsnetzes. Der Beton hat die Festigkeitsklasse B 45/35, das Grösstkorn beträgt 16 mm und der W/Z-Wert ist kleiner als 0.48. Das Hüllrohr, die Kupplungen und die Entlüftungsröhrchen stammen aus dem PT-Plus-System der Firma VSL.

Die 12 hergestellten Probekörper weisen verschiedene Fehlstellen im Hüllrohr auf:

Hüllrohr mit Löcher

Bei 6 Probekörpern wurden Löcher in das Hüllrohr gebohrt. Je zwei Probekörper weisen ein Loch von 2 mm, 10 mm bzw. 40 mm Durchmesser auf. In Längsrichtung des Hüllrohres sind die Löcher in der Mitte angeordnet, sie weisen nach oben. Mit diesen Probekörpern werden die Verletzungen im Hüllrohr nachgebildet, die vor allem beim Transport, bei der Lagerung auf der Baustelle und beim Einbau entstehen können.

Hüllrohr mit Entlüftungsröhrchen

Beim Verpressen des Hüllrohres mit Injektionsgut sind Entlüftungsröhrchen notwendig, damit die im Hüllrohr enthaltene Luft entweichen kann. Wenn diese Röhrchen nach dem Injizieren nicht gründlich verschlossen werden, kann Wasser und darin enthaltene Schadstoffe zum Spannstahl vordringen.

Um diese mögliche Fehlstelle zu untersuchen, wurden zwei Probekörper mit einem Entlüftungsröhrchen ausgestattet. Beim verwendeten Hüllrohrsystem werden die Röhrchen an einer Hüllrohrkupplung angeschraubt und das andere Ende nach dem Verpressen mit Injektionsgut mit einer Kunststoffkappe verschlossen (Abbildungen 3.2 und 3.3). Bei einem der beiden Probekörper ragt das Entlüftungsröhrchen ca. 5 cm aus dem Beton heraus, beim anderen befindet es sich vollständig im Beton.

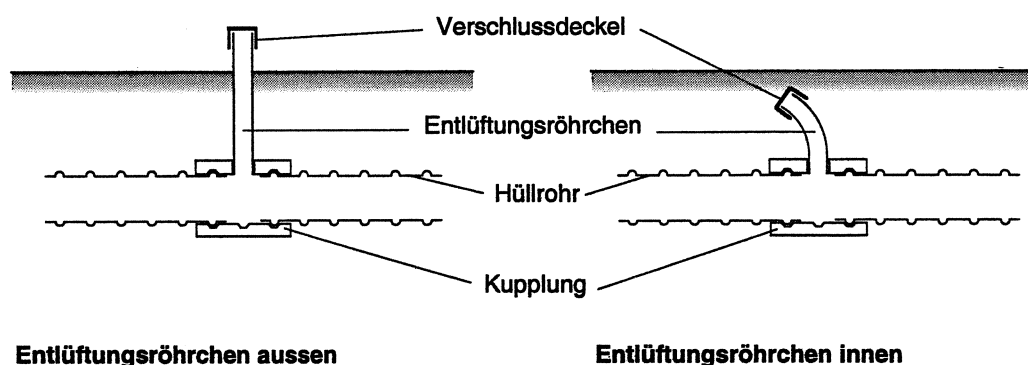


Abb. 3.2: Betonprobekörper mit Entlüftungsröhrchen

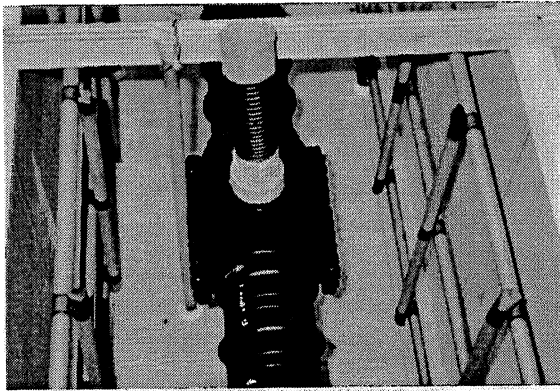


Abb. 3.3: Entlüftungsröhrchen aussen

Hüllrohr mit Kupplungen

Bei zwei Probekörpern wurde eine Hüllrohrkupplung eingebaut. Die verwendete Kupplung wird aus vier Einzelteilen zusammengesteckt (Abb. 3.4) und umschliesst das Hüllrohr durch ein integriertes Dichtungsprofil. Beim ersten Probekörper wurde nur eine Kupplung angebracht, beim zweiten wurde zusätzlich ein Schrumpfschlauch über die ganze Länge der Kupplung appliziert. Diese Massnahme soll die Dichtigkeit des Hüllrohrs zusätzlich erhöhen.

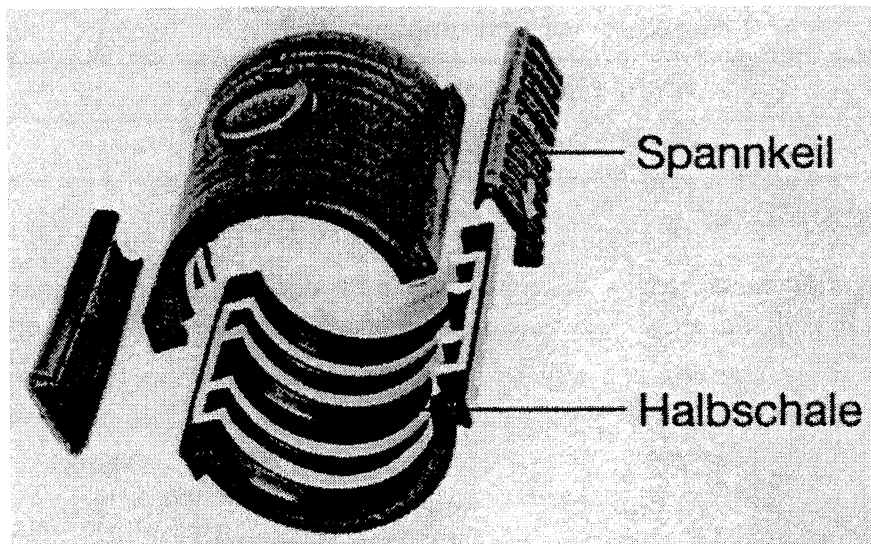


Abb. 3.4: Hüllrohrkupplung PT-Plus

Spiegelgeschweisstes Hüllrohr

Beim diesem Probekörper wurden zwei Hüllrohre durch Spiegelschweissung statt mit Kupplungen verbunden.

Referenz-Probekörper

Der Referenz-Probekörper dient zum Vergleich der Werte der Probekörper mit Fehlstellen mit denjenigen eines intakten Hüllrohrs. Somit wurde ein unverletztes Hüllrohr ohne Fehlstellen, Kupplungen und Schweißungen in den Referenz-Probekörper eingebaut.

Untenstehend ist eine Zusammenstellung der Betonprobekörper mit den später verwendeten Kurzbezeichnungen aufgeführt:

Kurzbezeichnung	Beschreibung
2A	Loch 2 mm
10A	Loch 10 mm
40A	Loch 40 mm
2B	Loch 2 mm
10B	Loch 10 mm
40B	Loch 40 mm
EA	Entlüftungsröhrchen aussen
EI	Entlüftungsröhrchen innen
KP	Kupplung
KSS	Kupplung mit Schrumpfschlauch
SS	Hüllrohr spiegelgeschweisst
RF	Referenz-Probekörper

Tab. 3.1: Betonprobekörper

An den Probekörpern sind verschiedene Anschlusspunkte für die elektrische Widerstandsmessung vorhanden. In Abb. 3.5 sind die Bezeichnungen angegeben, wie sie später verwendet werden.

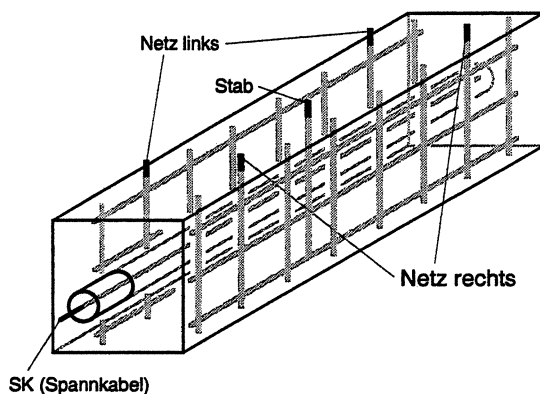


Abb. 3.5: Anschlussstellen für die elektrische Widerstandsmessung

3.1.2 Herstellung

Es wurden 4 Schalungen hergestellt, in denen je 3 Probekörper betoniert wurden (Abb. 3.6). Die Hüllrohre wurden mit den Fehlstellen versehen, an einem Ende mit einem Deckel verschlossen und der Stahlstab (Ersatz für Spannstahl) eingesetzt. Anschliessend wurde das Injektionsgut eingefüllt. Nach dem Erhärten des Injektionsguts wurde das Hüllrohr in die Schalung eingebaut und die beiden Bewehrungsnetze und der Einzelstab eingesetzt und fixiert. Nach dem Betonieren der Körper wurde die Betonoberfläche mit einer Kunststoffolie abgedeckt, um die Austrocknung zu verlangsamen.

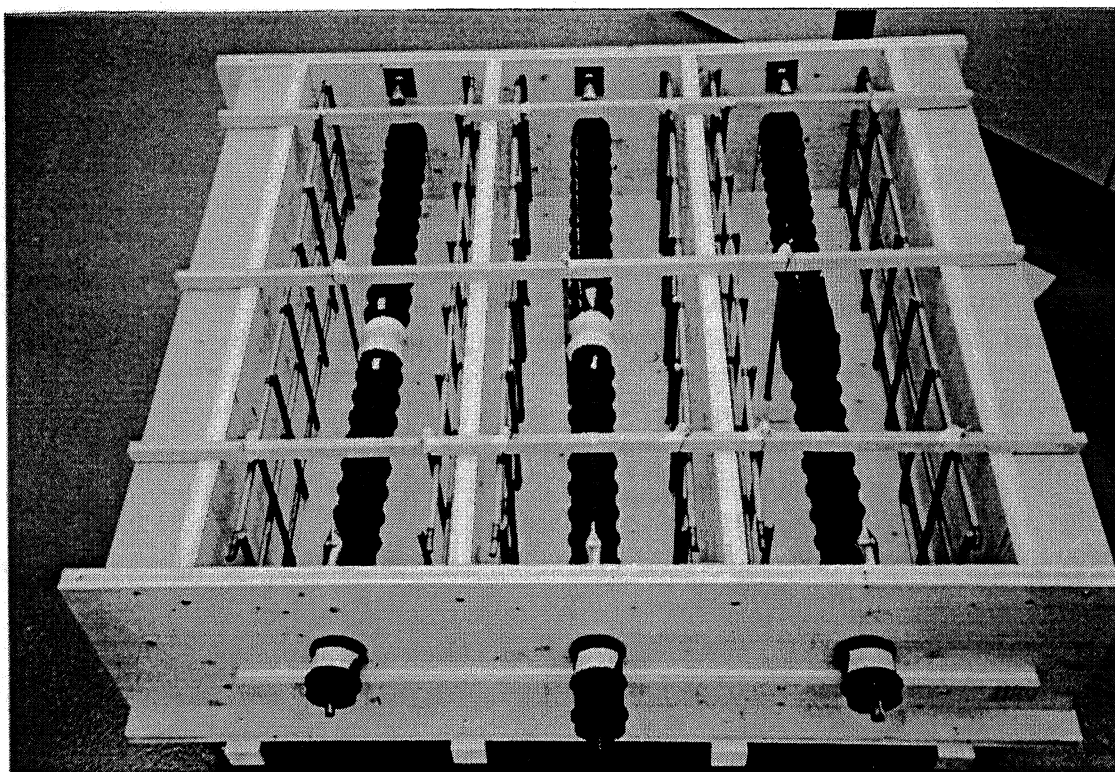


Abb. 3.6: Schalung der Betonprobekörper

3.1.3 Versuche

Mit den Versuchen an den Betonprobekörpern sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Erfassung des elektrischen Widerstands im Bereich von Fehlstellen für die theoretische Modellierung des Widerstands
- Beobachtung des zeitlichen Verlaufs der Widerstandswerte
- Evaluation der geeigneten Messtechnik für den praktischen Einsatz auf der Baustelle
- Erfassung des Einflusses der Temperatur auf den Widerstand
- Erfassung des Einflusses einer lokalen Befeuchtung des Betons auf den Widerstand

Um diese Ziele zu erreichen, wurden verschiedenartige Messungen durchgeführt:

Messungen mit Handmessgeräten und Aufnahme von Impedanzspektren

Um die Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten und die Präzision der Messgeräte zu untersuchen, wurden die Messungen des elektrischen Widerstands mit folgenden Geräten durchgeführt:

Messgerät	Verwendet für die Messung folgender Grössen
LCR-Meter Escort ELC-131 D	Ohmscher Widerstand R_{Ω} , Verlustfaktor D, Kapazität C, Messfrequenz: 1 kHz und 120 Hz
Universalerdungsmessgerät Norma Unilap Geo	Ohmscher Widerstand R_{Ω} Messfrequenz: 111 Hz
Multimeter Fluke 87	Gleichstromwiderstand R
Impedanzmessanlage Zahner IM6	Aufnahme Impedanzspektren Messfrequenz: 100 mHz bis 1 MHz

Tab. 3.2: *Verwendete Messgeräte*

Unmittelbar nach dem Betonieren der Probekörper wurden die Messungen in einem Abstand von 1 bis 4 Tagen durchgeführt, nach ungefähr einem Monat wurden die Messungen nur noch im Abstand von 1 bis 3 Wochen wiederholt. Die Häufigkeit der Messungen variiert je nach Bedeutung des Messgeräts.

Es standen verschiedene Anschlussstellen für die Messgeräte zur Verfügung (Abb. 3.5). Der elektrische Widerstand zwischen Spannkabel und Bewehrung wurde zwischen den Anschlüssen des linken Bewehrungsnetzes und des Spannkabels gemessen. Um diesen Wert zu überprüfen, wurde eine Messung zwischen dem rechten Bewehrungsnetz und dem Spannkabel durchgeführt. Für die Untersuchung des Einflusses der Fläche des Bewehrungsnetzes wurden die beiden Netze elektrisch miteinander verbunden und der Widerstand zum Spannkabel gemessen. Durch die Verbindung der beiden Netze wird gegen eine doppelt so grosse Fläche des Bewehrungsnetzes gemessen. Auch der umgekehrte Fall - eine kleine Fläche der Bewehrung - wurde durch die Messung gegen den Einzelstab untersucht. Zur Bestimmung des Betonwiderstands wurde der elektrische Widerstand zwischen den beiden Bewehrungsnetzen aufgenommen. Die Betonprobekörper wurden während der Messungen in der Schalung belassen. Um auszuschliessen, dass die Messungen durch eine elektrische Verbindung zum benachbarten Probekörper verfälscht werden, wurde der Widerstand zwischen den Bewehrungsnetzen zweier benachbarter Körper gemessen, in dem der Widerstand der Schalung enthalten ist. In Tabelle 3.3 sind die Anschlussstellen nochmals zusammengefasst.

Messung zwischen	Zweck
Netz links - SK (Spannkabel)	Messung elektrischer Widerstand zwischen Spannkabel und Bewehrung
Netz rechts - SK	Überprüfung der Messung Netz links - SK
Netz verbunden - SK	Überprüfung des Einflusses der Bewehrungsnetzfläche
Stab - SK	Unterschied zu Netz untersuchen
Netz - Netz	Bestimmung des Betonwiderstands
Netz links - Netz rechts des benachbarten Probekörpers	Überprüfung des Einflusses der Schalung

Tab. 3.3: Anschlussstellen für die Widerstandsmessung

4-Punkt-Messung an der Betonoberfläche

Der Betonwiderstand wurde zusätzlich zu den Messungen zwischen den beiden Bewehrungsnetzen durch eine 4-Punkt-Messung an der Betonoberfläche bestimmt.

Einfluss einer lokalen Befeuchtung

Um den Einfluss einer Befeuchtung des Betons zu untersuchen, wurden zwei Probekörper gegen Ende der Messreihe lokal befeuchtet. Zu diesem Zweck wurden die Probekörper 2B, 10B und 40B, die in der gleichen Schalung hergestellt wurden, ausgeschalt. Am Probekörper 10B wurde eine lokale Befeuchtung am Rande des Körpers vorgenommen, also entfernt von den Fehlstellen, die sich in der Mitte befinden (Abb. 3.7). Dadurch soll diese Massnahme keinen Einfluss auf den Widerstand haben. Die Befeuchtung wurde durch ein mit Wasser gefülltes Becken aus Kunststoff auf der Betonoberfläche bewerkstelligt. Im Gegensatz zum Probekörper 10B wurde der Körper 40B in der Mitte befeuchtet, d. h. direkt im Bereich der Fehlstellen. Es stand nur ein begrenzter Zeitraum von ca. 5 Wochen für die Befeuchtung zur Verfügung. Um ein grösseres Volumen zwischen Bewehrungsnetz und Fehlstelle zu befeuchten, wurde der Betonkörper auf die Seitenfläche gedreht, so dass sich der Wasserspiegel parallel zum Bewehrungsnetz befindet. Bei diesem Probekörper sollte ein Einfluss der Befeuchtung sichtbar sein, das Ziel besteht in Bestimmung der Grösse dieses Einflusses.

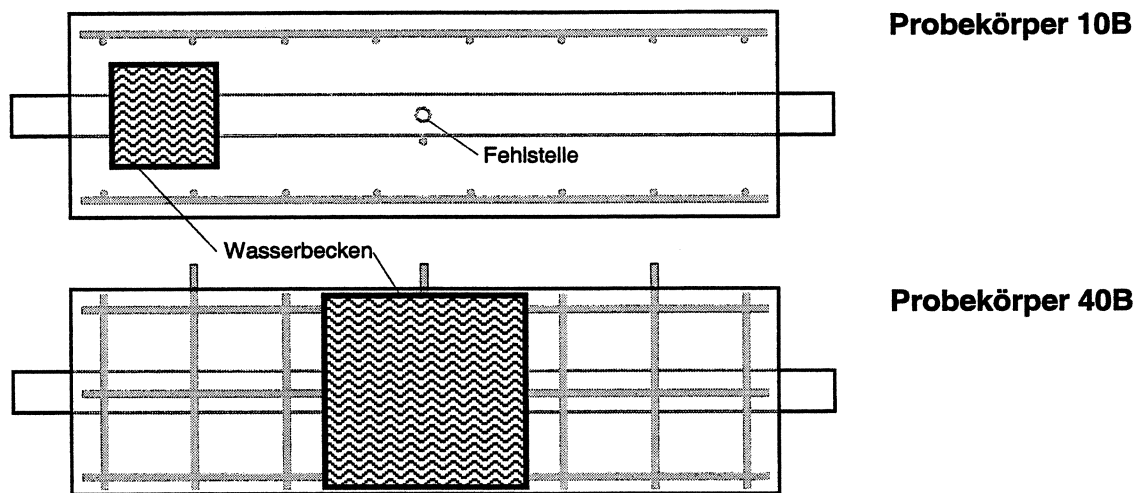


Abb. 3.7: Probekörper mit lokaler Befeuchtung

Messung mit Datenlogger

An den Probekörpern 2A, 10A und 40A wurde ein Datenlogger angeschlossen. Beim Probekörper 2A wurde der Betrag der Impedanz zwischen dem Spannkabel und dem linken Netz sowie der Wert zwischen den beiden Bewehrungsnetzen aufgenommen. Am Körper 10A wurde der Betrag der Impedanz zwischen dem Einzelstab und dem Spannkabel sowie zwischen Spannkabel und den elektrisch verbundenen Bewehrungsnetzen registriert. Der Betrag der Impedanz zwischen dem Spannkabel und den verbundenen Netzen wurde beim Probekörper 40A gemessen. Zudem wurde in den Probekörpern 2A und 2B eine Widerstandsleiter einbetoniert. Diese Widerstandsleiter weisen 8 Sprossen aus sandgestrahlten Stahlstäben mit einem Durchmesser von 4 mm auf, die zueinander 3 cm entfernt sind (Abb. 3.8). Zwischen je zwei benachbarten Sprossen wird der Betrag der Impedanz gemessen. Aufgrund dieser Messwerte kann der Betonwiderstand bestimmt werden. Dadurch erhält man ein Profil der Betonwiderstände über die Tiefe.

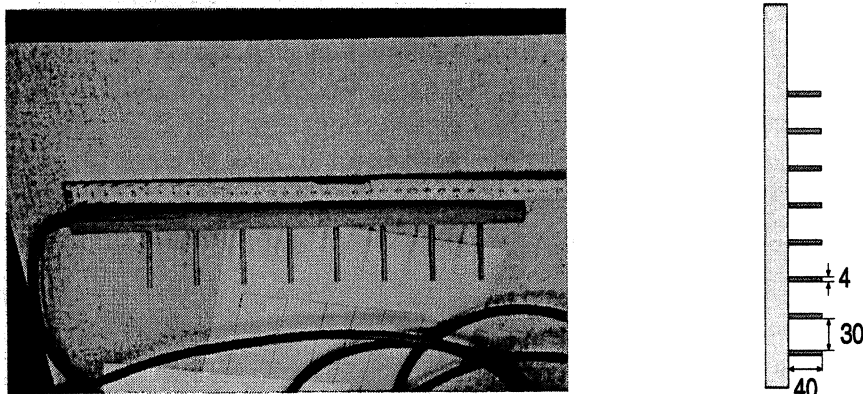


Abb. 3.8: Widerstandsleiter (Masse in mm)

Schliesslich wurde mit dem Datenlogger noch die Lufttemperatur und die Temperatur innerhalb des Betonkörpers 2A aufgenommen. Alle Messwerte wurden in einem zeitlichen Abstand von 30 Minuten registriert.

Die mit dem Datenlogger durchgeführten Messungen dienen als Vergleich zu den an den identischen Probekörpern 2B, 10B und 40B mit Handmessgeräten und Impedanzmessgerät aufgenommenen Werten. Durch den relativ kleinen Messintervall ist die zeitliche Entwicklung der Messwerte genau ersichtlich. Durch Aufnahme der Temperatur lässt sich dessen Einfluss bestimmen und die Widerstandswerte können mit einer Temperaturkompensation korrigiert werden.

3.2 PROBEKÖRPER IN LÖSUNG

Anhand der Versuche an Probekörpern in Lösung sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Bestimmung des Einflusses des Abstands der Bewehrungsnetze zur Fehlstelle
- Verhalten und Gesetzmässigkeiten der Messwerte bei unterschiedlichen Längen des Hüllrohrs überprüfen
- Verhalten und Gesetzmässigkeiten der Messwerte bei verschiedener Anzahl Löcher überprüfen
- Vergleich der Messwerte mit denjenigen der Betonkörper

3.2.1 Beschreibung der Probekörper

Es wurde ein Kunststoffbecken mit den gleichen Abmessungen wie diejenigen der Betonprobekörper hergestellt (Abb. 3.9). Die zwei kurzen Seitenwände weisen ein Loch für die Aufnahme des Hüllrohrs auf. Dieses kann ausgewechselt werden und wird nach dem Einbau mit Silikondichtungsmasse im Bereich des Lochs versehen, um die Dichtigkeit des Behälters zu gewährleisten. Als Ersatz für das Spannkabel diente ein Stahlstab mit einem Durchmesser von 12 mm aus hochlegiertem Stahl 1.4301. Dieser wurde durch zwei wasserdichte Kunststoffdeckel an den Enden des Hüllrohrs in die Mitte des Hüllrohrs positioniert (Abb. 3.10). Die beiden Bewehrungsnetze und der Einzelstab weisen die gleichen Abmessungen wie bei den Betonkörpern auf, sind jedoch aus hochlegiertem Stahl 1.4301. Der Abstand der Netze zur Fehlstelle kann in 5 verschiedenen Positionen variiert werden. Dies wird durch Distanzhalter bewerkstelligt. Als Fehlstellen dienen Löcher verschiedener Anzahl und Grösse. Diese wurden vor Ort von oben in das Hüllrohr gebohrt. Die verwendete Lösung wurde zuerst in einem neben dem Becken stehenden Behälter hergestellt. Die Messungen an den Betonkörpern ergaben eine Leitfähigkeit des Betons von ungefähr 100 mS/cm, somit wurde auch für die Lösung eine Leitfähigkeit von 100 mS/cm gewählt. Diese wurde aus entmineralisiertem Wasser und Zugabe von Natriumsulfat hergestellt. Es wurden jeweils 100 l Lösung angefertigt mit einer Zugabe von 13.3 g Natriumsulfat. Anschliessend wurde zuerst das intakte Hüllrohr in vertikaler Position mit Lösung gefüllt und der zweite Deckel angebracht. Dann wurde das Becken wieder in horizontaler Position gebracht und bis zu einem Flüssigkeitsstand von 30 cm mit Lösung aufgefüllt.

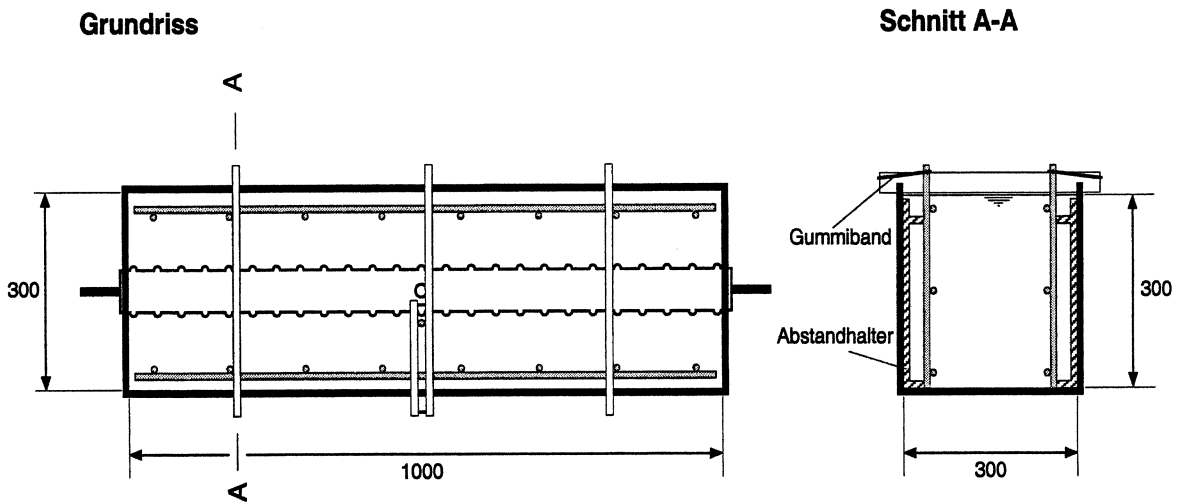


Abb. 3.9: Probekörper in Lösung (Masse in mm)

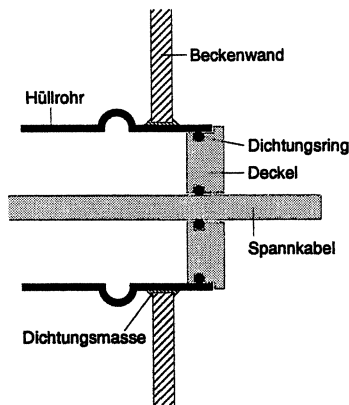


Abb. 3.10: Detail Wanddurchlass Hüllrohr mit Verschlussdeckel

Der elektrische Anschluss der Messgeräte an die Stäbe erfolgte mittels Klemmen (Abb. 3.11). Für den Einbau des Hüllrohrs mit nur 0.5 Meter Länge wurde ein Schott in Form einer Kunststoffplatte mit einem Loch für die Aufnahme des Hüllrohrs hergestellt. Dieses Schott wird in das Becken gestellt, mit Holzleisten fixiert und mit Silikondichtungsmasse abgedichtet. Das Hüllrohr wird in gleicher Weise wie beim Becken mit der vollständigen Länge eingebaut. Zum Vergleich mit den Werten der Widerstandsleitern in den Betonkörpern wurde auch eine solche Leiter für den Einsatz in der Lösung hergestellt. Sie weist nur zwei Sprossen auf, die Abmessungen sind jedoch identisch mit denjenigen der Widerstandsleitern in den Betonkörpern.

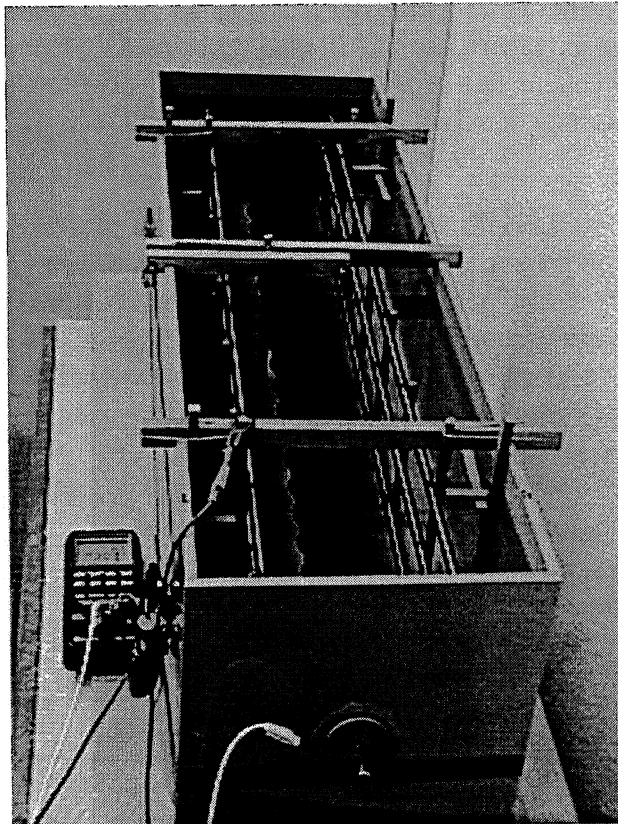


Abb. 3.11: Probekörper in Lösung

3.2.2 Versuche

Messgeräte

Zur Messung des elektrischen Widerstands wurde das LCR-Meter und zur Aufnahme der Impedanzspektren die Impedanzmessanlage eingesetzt. Zudem wurde vor jeder Messreihe die Leitfähigkeit der Lösung mit dem Leitfähigkeitsmessgerät WTW LF 537 kontrolliert.

Anschlussstellen

Bei den ersten Messungen wurde sämtliche Anschlusspunkte wie bei den Betonprobekörpern erfasst (Tab. 3.3). Bei den darauf folgenden Messungen wurde nur noch der Widerstand zwischen Spannkabel und Netz links, zwischen Spannkabel und Einzelstab und zwischen den beiden Bewehrungsnetzen aufgenommen. Zusätzlich wurden die Leitfähigkeit und die Temperatur der Lösung und die Werte der Widerstandsleiter gemessen.

Ablauf der Versuche

Zuerst wurde ein intaktes, 1 Meter langes Hüllrohr in das Becken eingebaut und die oben beschriebenen Messungen durchgeführt. Dabei wurde der Abstand der Bewehrungsnetze von der Fehlstelle in 5 Positionen variiert: Auf 1, 3, 5, 7 und 9 cm wurde der Abstand der Bewehrungsnetze von der Beckenwand mit Hilfe der Abstandhalter eingestellt. Danach wurde ein Loch von 2 mm Durchmesser in das Hüllrohr gebohrt und die Messungen wiederholt. Dieses

Loch wurde anschliessend auf 5 mm Durchmesser erweitert und die Messwerte erneut aufgenommen. Auch bei den Löchern von 2 und 5 mm wurde der Abstand der Netze in 5 Positionen variiert. Die folgenden Messungen mit einem Loch \varnothing 10 mm, 3 Löcher \varnothing 10 mm und 5 Löcher \varnothing 10 mm wurden hingegen nur bei einem Abstand des Netzes von der Beckenwand von 3 cm durchgeführt. Dieser Wert entspricht der Position der Bewehrungsnetze in den Betonkörpern.

Nach Abschluss dieser Messungen wurde das Hüllrohr ausgebaut, das Schott montiert und das Hüllrohr mit einer Länge von 50 cm eingebaut. Bei diesem Probekörper wurde am intakten Hüllrohr mit den 5 verschiedenen Abständen gemessen. Danach wurden die Messungen wiederum nur mit einem Abstand durchgeführt, und zwar mit einem Loch \varnothing 2mm, \varnothing 5 mm, \varnothing 10 mm und mit 3 Löchern \varnothing 10 mm. Die abschliessende Messung mit 5 Löchern \varnothing 10 mm wurde mit den 5 verschiedene Abständen vorgenommen.

Untenstehend sind die Versuche nochmals zusammengefasst:

Länge Hüllrohr	Fehlstellen	verschiedene Abstände
1 m	intaktes Hüllrohr	X
	Loch \varnothing 2 mm	X
	Loch \varnothing 5 mm	X
	Loch \varnothing 10 mm	
	3 Löcher \varnothing 10 mm	
	5 Löcher \varnothing 10 mm	X
0.5 m	intaktes Hüllrohr	X
	Loch \varnothing 2 mm	
	Loch \varnothing 5 mm	
	Loch \varnothing 10 mm	
	3 Löcher \varnothing 10 mm	
	5 Löcher \varnothing 10 mm	X
1 m	intaktes Hüllrohr	
	Loch \varnothing 2 mm	
	2 Löcher \varnothing 2 mm	
	2 Löcher \varnothing 5 mm	
	2 Löcher \varnothing 10 mm	

Tab. 3.4: Versuche an den Probekörpern in Lösung

3.3 MESSTECHNIK

3.3.1 2-Punkt-Messung

Die Messung des elektrischen Widerstands zwischen den Anschlussstellen ist eine 2-Punkt-Messung. Die Voraussetzung für eine störungsfreie Messung über längere Zeit ist eine dauerhafte und stabile Kontaktierung des Prüfkörpers mit den Elektroden. Diese Voraussetzung wird durch die Einbetonierung der Elektroden (Bewehrungsnetze, Einzelstab, Spannkabel) erreicht.

Bei der 2-Punkt-Messung wird die Spannung zwischen zwei Elektroden angelegt. An denselben Elektroden wird auch die Stromantwort des Prüfkörpers gemessen und daraus die Impedanz und die Phasenverschiebung berechnet. In der Stromantwort des Prüfkörpers steckt auch die Stromantwort der Elektrodenprozesse.

Durch die Messung des elektrischen Widerstands zwischen den beiden Bewehrungsnetzen lässt sich der spezifische elektrische Widerstand des Betons bestimmen. Durch die parallele Anordnung der Elektroden über zwei ganze, gegenüberliegenden Seitenflächen des Prüfkörpers wird ein homogenes elektrisches Feld erzielt, was die einfache Berechnung des spezifischen Widerstands ermöglicht:

$$\rho = \frac{R_{\Omega} A_Q}{l} \quad (3.1)$$

ρ	=	Spezifischer elektrischer Widerstand	[Ωm]
R_W	=	Ohmscher Widerstand	[Ω]
A_Q	=	Querschnittsfläche	[m^2]
l	=	Abstand der Elektroden	[m]

Die Querschnittsfläche beträgt bei den Betonprobekörpern 0.3 m^2 und der Abstand der Elektroden 0.24 m .

3.3.2 4-Punkt-Messung

Bei der 4-Punkt-Messung wird das äussere Elektrodenpaar dazu verwendet, einen Wechselstrom konstanter Stärke durch den Prüfkörper fließen zu lassen. Am inneren Elektrodenpaar wird die sich infolge des Widerstands einstellende Spannung abgegriffen. Dadurch werden die Elektrodenprozesse von der Impedanz des Prüfkörpers entkoppelt. Die ursprünglich in der Geologie zur Suche von Schichtgrenzen verwendete Methode, nach ihrem Entdecker auch Wenner-Methode genannt, ist in der Abb. 3.12 aufgezeichnet. Die untenstehende Gleichung besitzt ihre Gültigkeit jedoch nur bei Annahme eines homogenen, isotropen Halbraums.

$$\rho = \frac{2\pi aU}{I} \quad (3.2)$$

ρ	= spezifischer elektrischer Widerstand des Betons	[Ωm]
a	= Abstand zwischen den Elektroden	[m]
U	= gemessene Spannung	[V]
I	= eingespeister Strom	[A]

Der Abstand a zwischen den Elektroden beträgt bei der verwendeten Wenner-Sonde 4 cm.

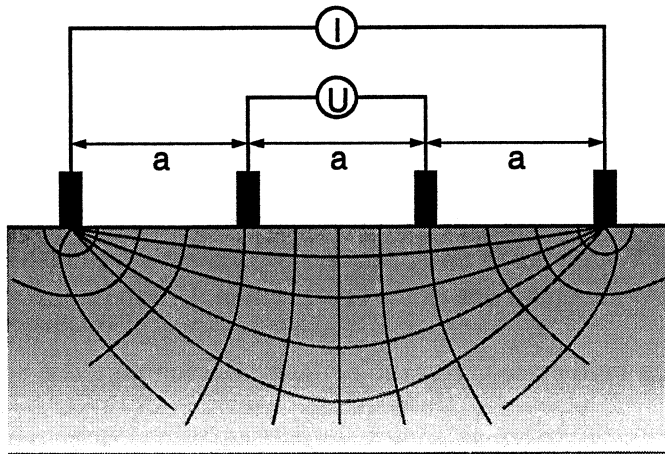


Abb. 3.12: 4-Punkt-Messung nach Wenner

Neben dem Vorteil der Entkoppelung der Elektrodenprozesse von der Impedanz des Prüfkörpers weist diese Methode noch einen weiteren Vorteil auf: die Messung kann mit einfachen Mitteln von der Oberfläche aus vorgenommen werden.

Bei der Anwendung der 4-Punkt-Messung ist die Messstelle auf der Betonoberfläche sorgfältig auszuwählen. Wird die Messsonde über eine oder mehrere Maschen der Bewehrung positioniert, fließt der Strom von den äusseren Elektroden bis zur vermaschten Bewehrung, welche einen niederohmigen, parallelgeschalteten Leiter zum Beton darstellt. Dadurch wird der spezifische Widerstand so massiv unterschätzt, dass eine Messung nur innerhalb einer Mache der Bewehrung stattfinden kann, da sonst nicht der spezifische Widerstand des Betons, sondern der Bewehrungsgehalt massgebend wird. Der Quotient aus dem Abstand zwischen äusserer Elektrode und der nächsten Bewehrung und dem Abstand zwischen den Elektroden sollte deshalb den Wert von 1.5 nicht unterschreiten.

3.3.3 Messgeräte

LCR-Meter Escort ELC-131 D

Dieses LCR-Meter ist handlich, leicht und preisgünstig in der Anschaffung. Durch diese Eigenschaften ist es gut geeignet für den praktischen Einsatz am Bauwerk. Die Dokumentation ist jedoch mangelhaft. Aus dieser kann nicht entnommen werden, welcher Widerstand (Betrag der Impedanz, Realteil der Impedanz, ohmscher Widerstand) gemessen wird. Mit aufwendigen Kontrollmessungen und Berechnungen wurde dies geklärt: Es wird der ohmsche Widerstand einer Parallel- oder einer Serieschaltung mit einem kapazitiven Widerstand angezeigt. Neben diesem Wert wird mit dem Gerät die Kapazität C und der Verlustfaktor D ge-

messen. Die Messungen werden mittels Wechselstrom mit einer Frequenz von 1 kHz oder 120 Hz und einer Spannung von 0.9 V durchgeführt. Der Messbereich für den ohmschen Widerstand reicht bis zu 10 M Ω .

Bei der Widerstandsmessung ist standardmässig der Parallelmodus eingeschaltet. Der gemessene Wert wird umgerechnet in einem ohmschen Widerstand R_W , der mit einem kapazitiven Widerstand R_C parallelgeschaltet ist (Abb. 3.13).

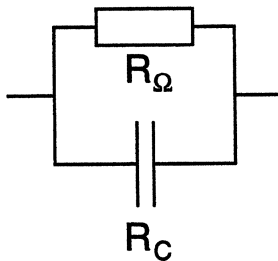


Abb. 3.13: Parallelschaltung von ohmschem und kapazitivem Widerstand

Die gemessenen Werte R_W und D können zum Vergleich mit den Werten des Impedanzmessgerätes in den Betrag der Impedanz $|Z|$ und in den Phasenwinkel φ umgerechnet werden:

Aus Gleichung 2.26 folgt:

$$Z_C = -D R_W \quad (3.3)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 3.3 in die Gleichungen 2.23, 2.24, 2.25 und 2.27 folgt:

$$\operatorname{RE}(Z) = \frac{R_\Omega}{1 + \frac{1}{D^2}} \quad (3.4)$$

$$\operatorname{IM}(Z) = \frac{R_\Omega}{D + \frac{1}{D}} \quad (3.5)$$

$$|Z| = \frac{R_\Omega}{\sqrt{1 + \frac{1}{D^2}}} \quad (3.6)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{D}\right) \quad (3.7)$$

Umgekehrt lassen sich aus $|Z|$ und φ die Werte des LCR-Meters durch folgende Gleichungen ermitteln:

$$D = \frac{1}{\tan \varphi} \quad (3.8)$$

$$R_{\Omega} = |Z| \sqrt{1 + \tan^2 \varphi} \quad (3.9)$$

Die Messwerte können auch im Seriemodus angezeigt werden. Der gemessene Wert wird umgerechnet in einen ohmschen Widerstand R_{Ω} , der mit einem kapazitiven Widerstand R_C in Serie geschaltet ist (Abb. 3.14). Der Seriemodus ist jedoch nicht gut geeignet für die Messung des Widerstands, da nach jeder Messung in diesen Modus erneut umgeschaltet werden muss und weil der Messwert im gleichen Anzeigebereich wie im Parallelmodus angezeigt wird. Dadurch ergibt sich bei hohen kapazitiven Widerständen eine zu kleine Auflösung des Messwerts.

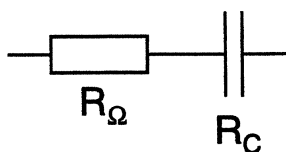


Abb. 3.14: Serieschaltung von ohmschem und kapazitivem Widerstand

Die Gleichungen zur Umrechnung von R_{Ω} und D in $|Z|$ und φ können hergeleitet werden durch Einsetzen der Gleichung 2.19 in die Gleichungen 2.16, 2.17, 2.18 und 2.20:

$$\operatorname{RE}(Z) = R_{\Omega} \quad (3.10)$$

$$\operatorname{IM}(Z) = \frac{R_{\Omega}}{D} \quad (3.11)$$

$$|Z| = R_{\Omega} \sqrt{1 + \frac{1}{D^2}} \quad (3.12)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{D}\right) \quad (3.13)$$

Umgekehrt lassen sich aus $|Z|$ und φ die Werte des LCR-Meters durch folgende Gleichungen ermitteln:

$$D = \frac{1}{\tan \varphi} \quad (3.14)$$

$$R_{\Omega} = \frac{|Z|}{\sqrt{1 + \frac{1}{D^2}}} \quad (3.15)$$

Universalerdungsmessgerät Norma Unilap Geo

Angezeigt wird der ohmsche Widerstand im Parallelmodus. Die übliche Anwendung dieses Geräts liegt in der Messung des Erdungswiderstands. Dadurch reicht der Messbereich nur bis zu einem Wert von 300 k Ω , wodurch nur die Widerstände grosser Fehlstellen erfassbar sind. Die Messfrequenz kann zwischen den Werten 94, 105, 111 und 128 Hz gewählt werden und die Messspannung beträgt 20 V. Mit diesem Messgerät wurden auch die 4-Punkt-Messungen mit der Wenner-Sonde durchgeführt.

Multimeter Fluke 87

Dieses Gerät wird zur Messung des Widerstands mit Gleichstrom benutzt. Bei Probekörpern mit kleinen Fehlstellen ist wegen des sehr grossen Gleichstromwiderstands des Hüllrohrs keine Messung möglich. Bei der Aufnahme des Betonwiderstands und des Widerstands bei Probekörpern mit grossen Fehlstellen wird durch die Prozesse der Ionenwanderung im Beton kein konstanter Wert angezeigt.

Impedanzmessanlage Zahner IM6

Zur Aufnahme der Impedanzspektren wurde dieses Gerät eingesetzt. Die Messfrequenz lässt sich zwischen 100 mHz und 1 MHz variieren, wobei die meisten Impedanzspektren mit einem Frequenzbereich von 100 mHz bis 100 kHz gemessen wurden. Die Amplitude der Messspannung lässt sich von 1 bis 1000 mV einstellen, standardmässig wurde mit einem Wert von 5 mV gemessen. Die Messergebnisse lassen sich entweder in einem Bode- oder in einem Nyquist-Plot darstellen.

3.4 PILOTOBJEKTE

Während der Dauer der Forschungsarbeiten wurde eng mit der Arbeitsgruppe von ASTRA / SBB zusammengearbeitet, welche die Richtlinie „Korrosionsschutz von Spanngliedern im Brückenbau“ [4] erarbeitete. Deshalb wurden - in Ergänzung zum ursprünglichen Forschungsauftrag - auch Feldmessungen mit der elektrischen Widerstandsmessung ausgeführt.

3.4.1 P.S. du Milieu

Der Pont du Milieu überquert die Autobahn A1 in der Nähe von Avenches (Kanton Waadt). Er ist ca 100 m lang und wird von 5 Betonpfeilern gestützt. Auf diesen Pfeilern liegen Querträger aus Beton, welche vorgespannt sind. Sie tragen zwei ebenfalls mit je drei VSL PT Plus Kabeln vorgespannte, 100 m lange Längsträger. Ueber jedem Brückenpfeiler durchlaufen die Spannkabel einen Hochpunkt. Die Längskabel sowie deren Ankerköpfe sind elektrisch isoliert ausgeführt.

Die total sechs elektrisch isolierten Spannglieder (PT-Plus 59 mm mit 4 bzw. 5 Litzen zu 0.6") lagen in Gruppen zu je drei Kabeln in zwei Längsträgern. An beiden Enden wurde an der Ankerplatte je ein elektrischer Anschluss (Koaxialkabel, Impedanz 50 Ω) angebracht

und die Kabel in einen Messkasten zusammengefasst. Zusätzlich wurde je ein Anschluss an die schlaffe Bewehrung erstellt. Der Pont du Milieu wurde ebenfalls im Forschungsauftrag 81/93 (Zerstörungsfreie Spannkabelprüfung mit Reflektrometrischer Impulsmessung) [1] als Pilotobjekt verwendet.

Messungen des elektrischen Widerstands wurden vor dem Injizieren und erstmals am 20.4.93 nach dem Injizieren durchgeführt.

3.4.2 Burg-Aderahubel

Die Brücke Burg-Aderahubel (Feldwegüberführung) überquert die Autobahn A1 bei Murten (Kanton Fribourg) ohne Zwischenstützen zwischen den beiden Widerlagern. Sie ist ca. 60 m lang. Zwei betonierte Längsträger sind mit je 3 in einem Kunststoffhüllrohr liegenden, elektrisch isolierten Spanngliedern vorgespannt (PT Plus 100 mm). In der Mitte der Brücke durchlaufen die Spannglieder einen Hochpunkt, davor und danach liegt je ein Tiefpunkt. Im Frühjahr 1993 wurden die Kunststoffhüllrohre zusammen mit der schlaffen Bewehrung verlegt und Steg bzw. Brückenplatte betoniert. An beiden Enden wurde an der Ankerplatte je ein elektrischer Anschluss (Koaxialkabel, Impedanz 50Ω) angebracht und die Kabel in einen Messkasten zusammengefasst. Zusätzlich wurde je ein Anschluss an die schlaffe Bewehrung erstellt. Die Brücke Burg-Aderahubel wurde ebenfalls im Forschungsauftrag 81/93 (Zerstörungsfreie Spannkabelprüfung mit Reflektrometrischer Impulsmessung) [1] als Pilotobjekt verwendet.

Messungen des elektrischen Widerstands wurden vor dem Injizieren sowie am 6.6.93 erstmals nach dem Injizieren durchgeführt.

3.4.3 P.S. Pré du Mariage

Die Überführung P.S. du Mariage überquert die neuerstellte Autobahn A1 bei Estavayer-le-lac auf einer Länge von 49.3 m. Sie weist eine Mittelstütze auf und enthält sechs isolierte Spannglieder mit Kunststoffhüllrohren (PT Plus 76 mm). An einem Ende wurde an jeder Ankerplatte ein elektrischer Anschluss erstellt und in einen Messkasten geführt. Zusätzlich wurde ein Anschluss an die schlaffe Bewehrung erstellt.

4 RESULTATE

In diesem Kapitel werden zunächst die Resultate der Laborversuche an Betonprüfkörpern und in Lösung präsentiert. Anschliessend (Kap. 4.3) werden die Erfahrungen und Messwerte des elektrischen Widerstands an einigen Pilotobjekten dokumentiert.

4.1 BETONPROBEKÖRPER

4.1.1 Ohmscher Widerstand im Ausgangszustand

Die erste Messung an den Probekörpern wurde nach ca. Tagen durchgeführt. Die zu diesem Zeitpunkt aufgenommenen Werte sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Probekörper	2B	10B	40B
Ohmscher Widerstand R_{Ω}	52.6 k Ω	2.68 k Ω	0.413 k Ω

Probekörper	EA	EI	KP
Ohmscher Widerstand R_{Ω}	36.5 k Ω	84.4 k Ω	3370 k Ω

Probekörper	KSS	SS	RF
Ohmscher Widerstand R_{Ω}	2790 k Ω	4300 k Ω	4171 k Ω

Tab. 4.1: Ohmsche Widerstände der Betonprobekörper nach 4 Tagen, gemessen mit dem LCR-Meter zwischen dem Spannkabel und dem linken Bewehrungsnetz mit einer Frequenz von 1 kHz

Die Probekörper lassen sich nach der Grössenordnung des Widerstands in zwei Gruppen einteilen: die erste Gruppe umfassend die Probekörper 2B, 10B und 40B (Hüllrohr mit Löchern von Durchmesser 2, 10 und 40 mm) sowie EA und EI (Entlüftungsröhrchen), sie weist Widerstandswerte unter 100 k Ω auf, alle anderen Probekörper besitzen Werte über 1 M Ω .

4.1.2 Zeitlicher Verlauf des Widerstands

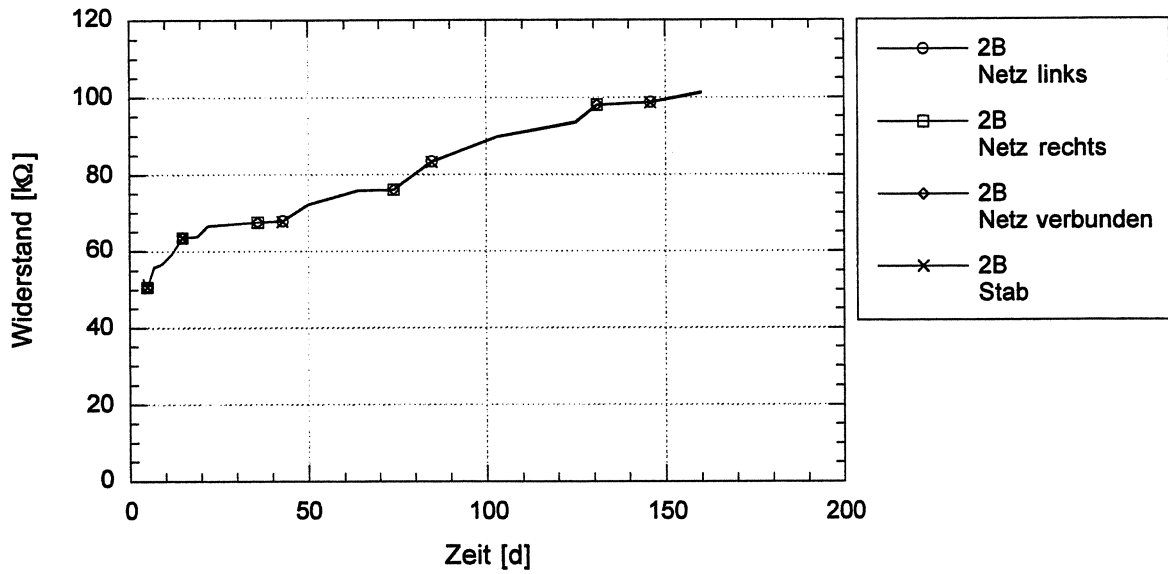


Abb. 4.1: Zeitlicher Verlauf des ohmschen Widerstands beim Probekörper 2B, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz

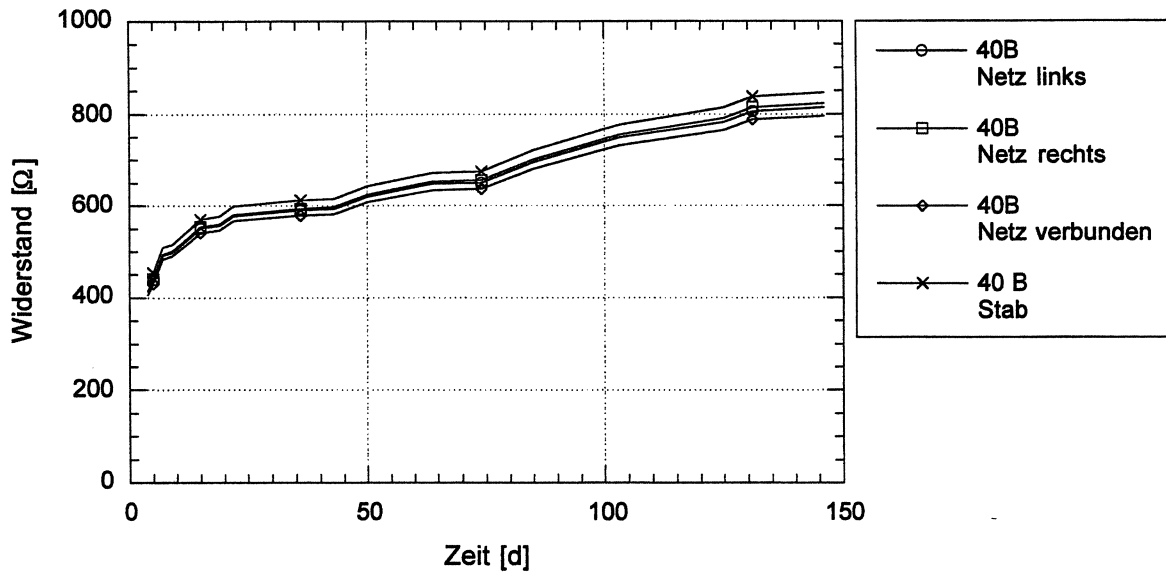


Abb. 4.2: Zeitlicher Verlauf des ohmschen Widerstands beim Probekörper 40B, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz

Aus Abbildung 4.1 und 4.2 ist ersichtlich, dass der ohmsche Widerstand zwischen dem Spannstahl im Hüllrohr und der schlaffen Bewehrung kontinuierlich ansteigt und sich nach 160 Tage ungefähr verdoppelt hat. Während beim Probekörper 2B (Abb. 4.1) kein Unterschied zwischen den verschiedenen Anschlussstellen (Netz links, Netz rechts oder Stab) be-

obachtet werden kann, sind beim Probekörper 40B Differenzen sichtbar: die höchsten Werte werden gegen den (kurzen) Stab gemessen, die tiefsten gegen die elektrisch gekoppelten Bewehrungsnetze. Der Probekörper 10B zeigt das gleiche Verhalten wie der Körper 2B.

Die grössten Widerstandsänderungen zeigt der Probekörper EA (Abb. 4.3) mit dem aus dem Beton herausragenden Entlüftungsröhr. Zwischen 50 und 100 Tagen zeigt dieser Probekörper einen sehr starken Anstieg des Widerstands. Der Probekörper EI (Entlüftungsröhr innen) zeigt in etwa denselben Verlauf wie die Probekörper mit Löchern (Abb. 4.1, 4.2).

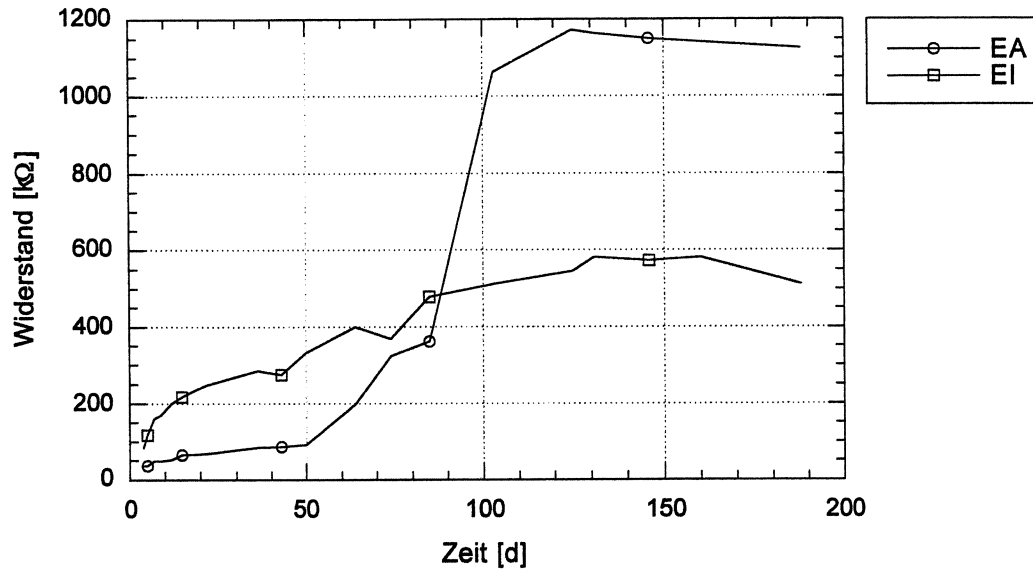


Abb. 4.3: Zeitlicher Verlauf des ohmschen Widerstands bei den Probekörpern EA und EI, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz am linken Netz

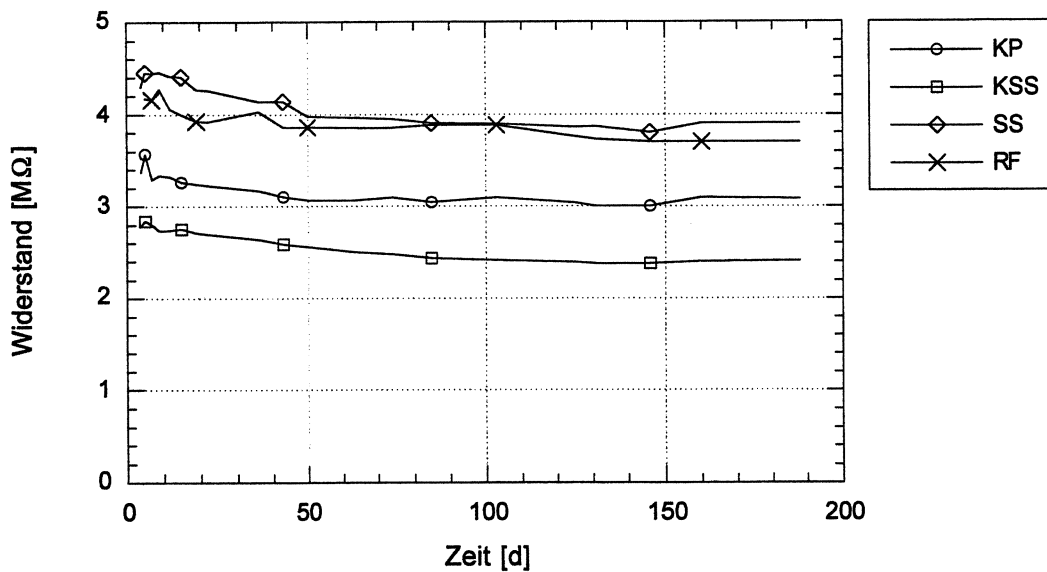


Abb. 4.4: Zeitlicher Verlauf des ohmschen Widerstands bei den Probekörpern KP, KSS, SS und RF, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz am linken Netz

Die ohmschen Widerstände zwischen dem Spannstahl im Hüllrohr und dem Bewehrungsnetz der Probekörper mit intakten Hüllrohren (Abb. 4.4) sinken mit der Zeit leicht ab. Das spiegelgeschweisste Hüllrohr (SS) und das Referenzhüllrohr (RF) zeigen in etwa die gleichen Werte, währenddem die Probekörper mit gekoppelten Hüllrohr (KP) sowie Kupplung und Schrumpfschlauch (KSS) deutlich tiefere Widerstände zeigen.

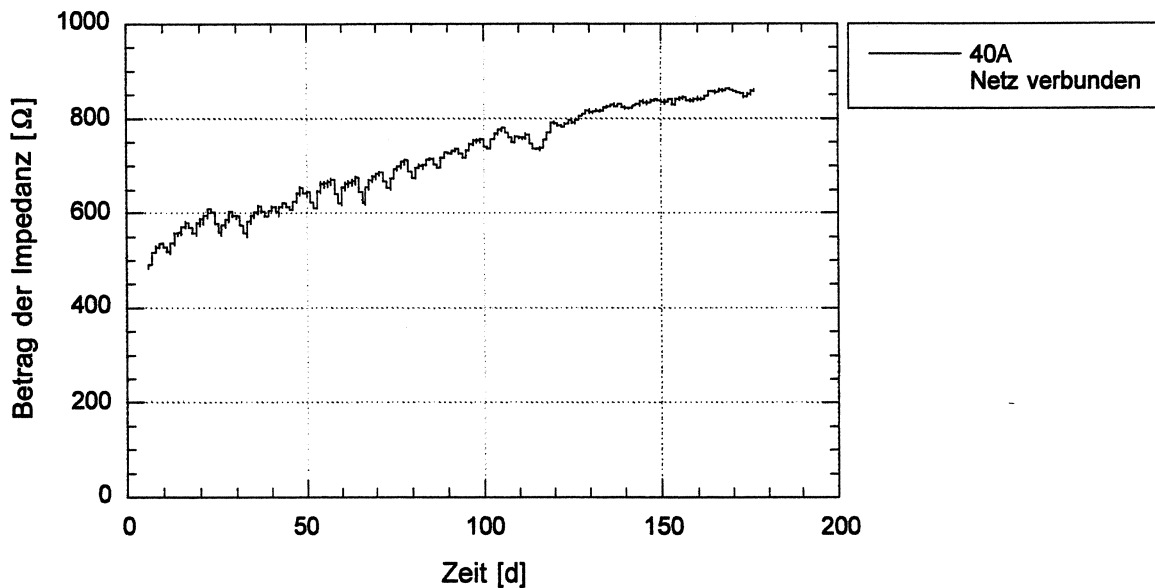


Abb. 4.5: Zeitlicher Verlauf des Betrags der Impedanz beim Probekörper 40A, gemessen mit dem Datenlogger bei einer Frequenz von 1 kHz gegen die verbundenen Netze

Die kontinuierlichen Messungen mit dem Datenlogger (Abb. 4.5) zeigen, dass die Widerstandswerte zyklisch leicht schwanken. Der Probekörper 40B weist auch in dieser Messung einen Anstieg des Widerstands von ca. Faktor 2 auf, ebenso der Probekörper 10. Der Probekörper mit den kleinsten Löchern zeigt jedoch einen deutlich geringeren Anstieg (25%).

4.1.3 Messung bei verschiedenen Frequenzen

Mit dem LCR-Meter ist es möglich, mit zwei verschiedenen Frequenzen zu messen: mit 1 kHz und 120 Hz. Eine Messung mit jeder beliebigen Frequenz zwischen 100 mHz und 1 MHz lässt sich mit der Impedanzmessanlage durchführen. Die anderen verwendeten Geräte verfügen nur über eine einzige Messfrequenz.

Ein Vergleich der Messungen bei den beiden Frequenzen des LCR-Meters zu 3 verschiedenen Zeitpunkten am Betonkörper 40B ist in der Abbildung 4.6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Messfrequenz praktisch keinen Einfluss auf den Widerstand hat. Der gleiche Sachverhalt lässt sich auch am Probekörper 10B beobachten.

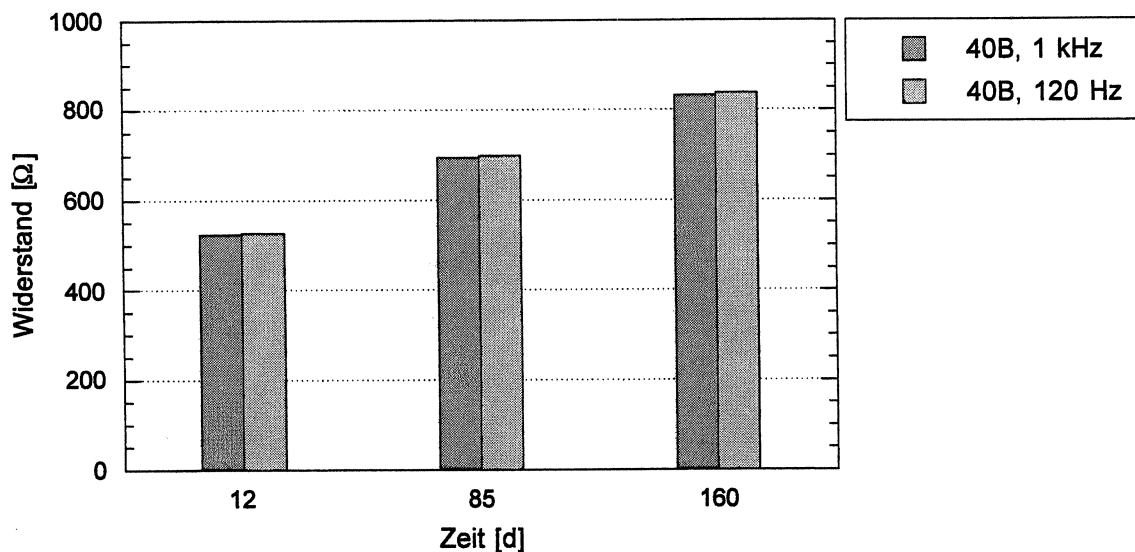


Abb. 4.6: Ohmscher Widerstand des Probekörpers 40B zu drei verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit dem LCR-Meter mit den Frequenzen 1 kHz und 120 Hz am linken Netz

Beim Probekörper 2B resultiert ein leichter Unterschied in den Messwerten bei einer Frequenz von 1 kHz und 120 Hz (Abb. 4.7). Die grösste Abweichung beträgt 4 %.

Das Impedanzspektrum des Probekörpers RF (Abb. 4.8) zeigt in der logarithmischen Darstellung einen linearen Anstieg der Impedanz mit abnehmender Frequenz. Die Phasenverschiebung liegt über den ganzen Frequenzbereich nahe bei -90° .

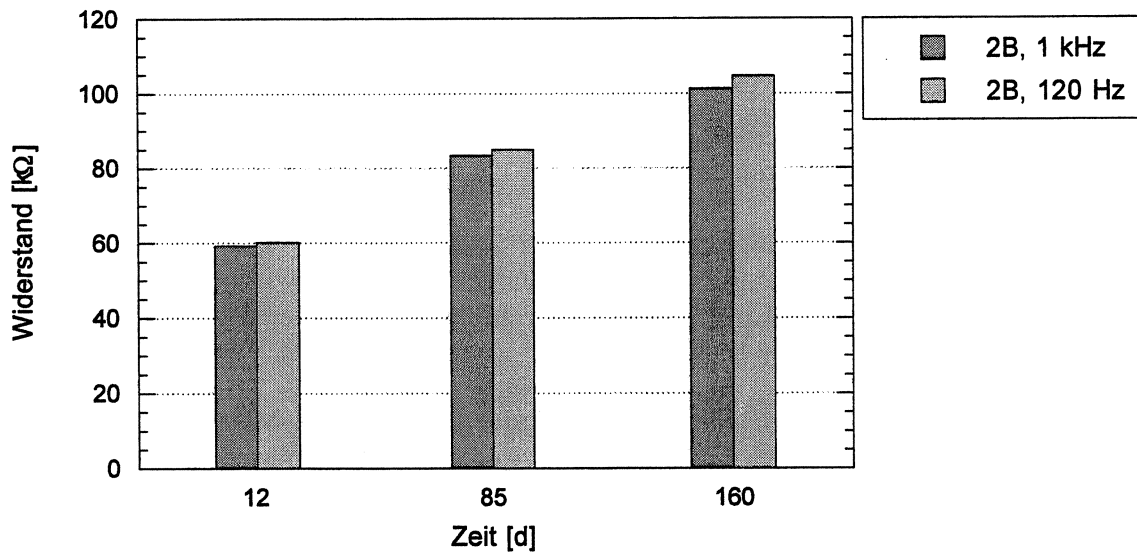


Abb. 4.7: Ohmscher Widerstand des Probekörpers 2B zu drei verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit dem LCR-Meter mit den Frequenzen 1 kHz und 120 Hz am linken Netz

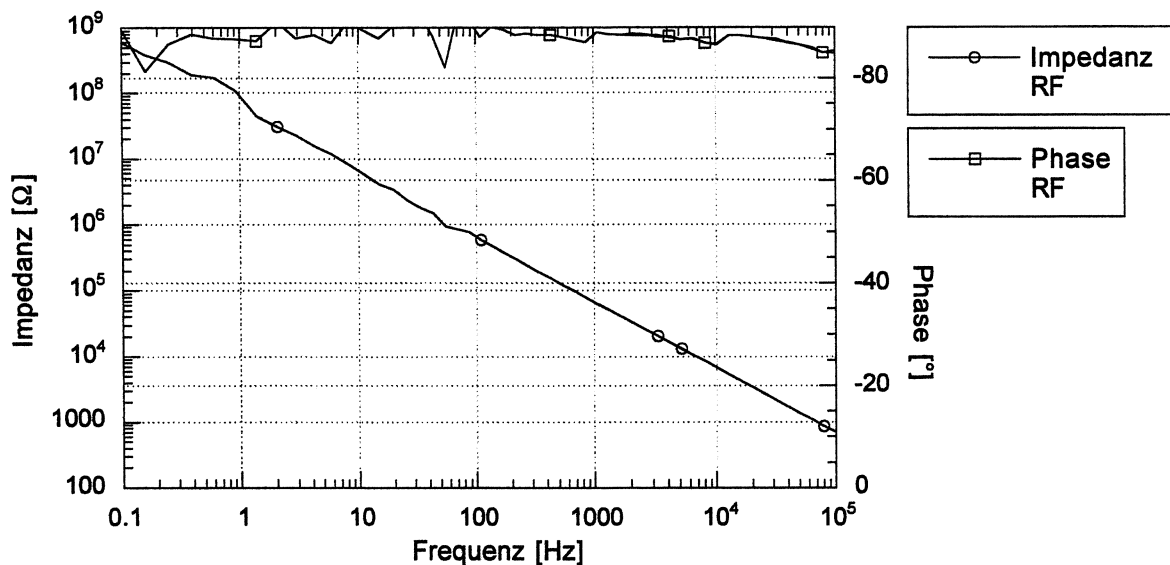


Abb. 4.8: Impedanzspektrum des Referenzkörpers (RF) nach 125 Tagen, Messung zwischen Spannstaht im Hüllrohr und Bewehrungsnetz links

Das Impedanzspektrum des Probekörpers 10B (Abb. 4.9) zeigt in der logarithmischen Darstellung ebenfalls einen linearen Anstieg der Impedanz mit abnehmender Frequenz bis zu einem Wert von etwa 30 kHz. Bei weiter abnehmender Frequenz geht die Impedanz über zu einem Plateau mit einem konstantem Wert von 4.6 kW. Der Phasenwinkel liegt bei den Frequenzen unter 100 Hz im Bereich von 0°. Er unterscheidet sich bei den beiden Messfrequenzen des LCR-Meters - 1 kHz und 120 Hz - um den Faktor 7.5.

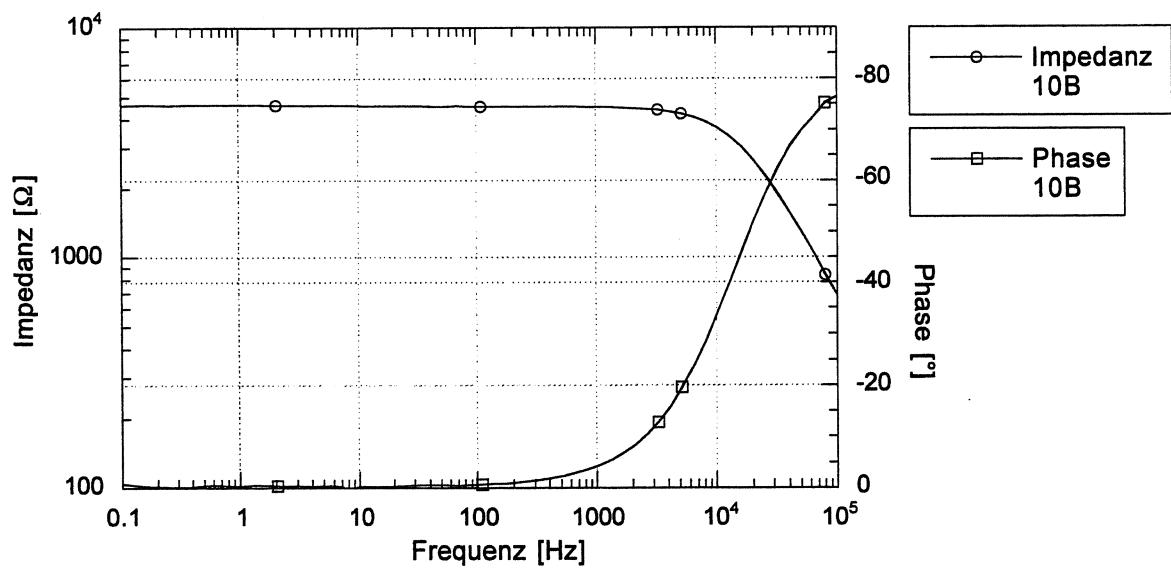


Abb. 4.9: Impedanzspektrum des Probekörpers mit einem Loch von 10 mm Durchmesser (10B) nach 125 Tagen, Messung zwischen Spannstahl im Hüllrohr und Bewehrungsnetz links

4.1.4 Messung mit verschiedenen Geräten

Die Messwerte des LCR-Meters mit einer Frequenz von 120 Hz und des Erdungsmessgeräts mit einer Frequenz von 111 Hz werden in der Abbildung 4.9 verglichen. Es ist kein Unterschied der Werte feststellbar. Auch beim Probekörper 10 sind die Werte ungefähr gleich.

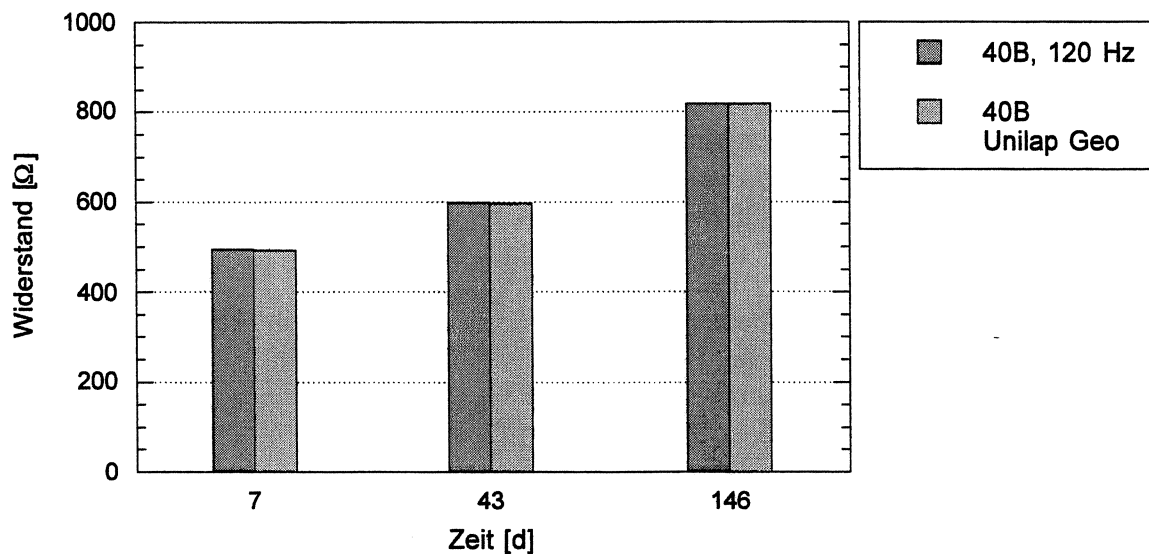


Abb. 4.10: Ohmscher Widerstand des Probekörpers 40B zu drei verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit dem LCR-Meter mit 120 Hz und dem Erdungsmessgerät mit 111 Hz am linken Netz

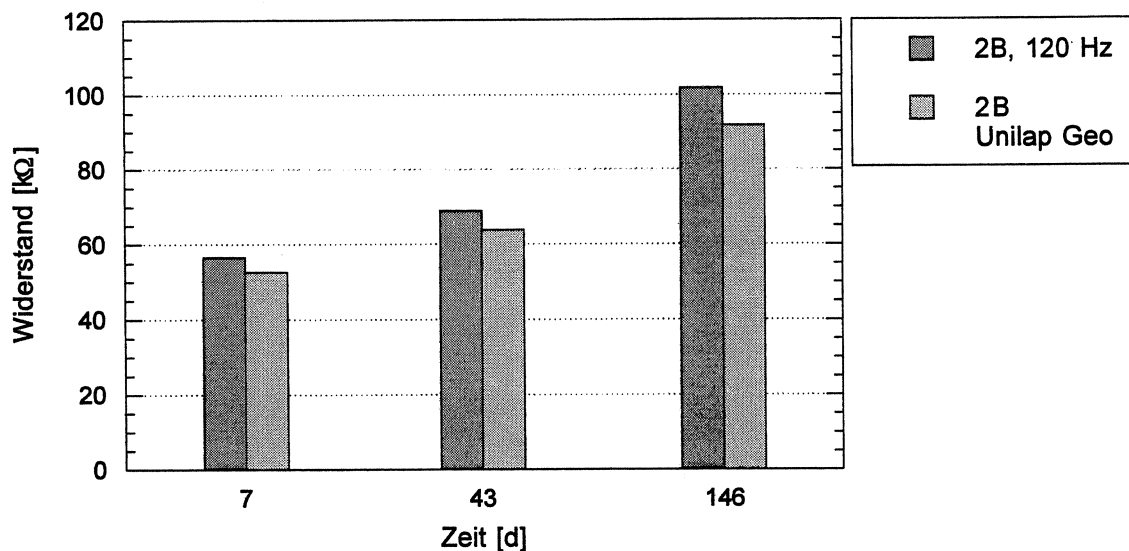


Abb. 4.11: Ohmscher Widerstand des Probekörpers 2B zu drei verschiedenen Zeitpunkten, gemessen mit dem LCR-Meter mit 120 Hz und dem Erdungsmessgerät mit 111 Hz am linken Netz

Beim Probekörper 2B hingegen bestehen zwischen den beiden Messgeräten Differenzen beim Widerstand von bis zu 11 % (Abb. 4.11).

Mit dem Erdungsmessgerät Unilap Geo war bei den Körpern KP, KSS, SS und RF wegen Überschreiten des Messbereichs keine Messung möglich. Die Messung des Widerstands mit Gleichstrom ist nicht praktikierbar, weil der Wert in der Anzeige des Messgeräts dauernd variiert.

4.1.5 Verlustfaktor und Kapazität

Mit der Messung des Verlustfaktors D und der Kapazität C des Systems Spannstahl im Hüllrohr / Beton / Bewehrungsnetz wurde erst 131 Tage nach Betonieren der Probekörper angefangen, daher können keine Aussagen über den zeitlichen Verlauf dieser Werte gemacht werden. Bei den vier durchgeführten Messungen innerhalb der letzten 57 Tage der Messdauer blieb der Verlustfaktor und die Kapazität praktisch konstant.

Die Werte von D und C , gemessen nach 160 Tagen, sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Die Kapazitäten der Probekörper RF, SS, KP sowie 2B und 10B sind alle sehr ähnlich (Mittelwert und Stdev), bei tieferen Frequenzen (120 Hz) werden leicht höhere Werte gemessen. Die Kapazitätswerte der beiden Probekörper mit aufgesetzten Entlüftungsröhrchen sind deutlich höher, jene des Probekörpers KSS (Kupplung und Schrumpfschlauch) deutlich geringer.

Der Verlustfaktor D liegt für die Probekörper RF, SS und KP im gleichen Bereich, die Werte des Probekörpers KSS sind bereits doppelt so hoch. Die grössten Verlustfaktoren zeigen die Probekörper mit Verletzungen (2B, 10B). Die Messwerte von D bei tiefen Frequenzen liegen bei kleinen Werten deutlich unter denjenigen bei 1000 Hz, hohe Verlustfaktoren zeigen einen Anstieg mit sinkender Messfrequenz.

	2B	10B	40B	EA	EI	KP	KSS	SS	RF
D 1 kHz [-]	0.654	13.8	*	0.053	0.097	0.022	0.034	0.017	0.018
D 120 Hz [-]	5.07	111	*	0.044	0.534	0.012	0.017	0.007	0.008
C 1 kHz [nF]	2.38	2.40	*	2.60	2.78	2.31	1.93	2.34	2.32
C 120 Hz [nF]	2.46	2.50	*	2.70	2.87	2.37	2.01	2.39	2.37

Tab. 4.2: * = nicht messbar, da ausserhalb des Messbereichs des LCR-Meters
Verlustfaktor und Kapazität nach 160 Tagen, gemessen mit dem LCR-Meter mit den Frequenzen 1 kHz und 120 Hz am linken Netz

4.1.6 Einfluss der Temperatur

Der Temperatursensor im Probekörper 2A wurde erst nach 50 Tagen eingebaut. Wenn der Temperaturverlauf (Abb. 4.12) mit dem Verlauf des Betrags der Impedanz (Abb. 4.5) verglichen wird, so fällt auf, dass beide Messgrössen dieselben zyklischen Schwankungen aufweisen.

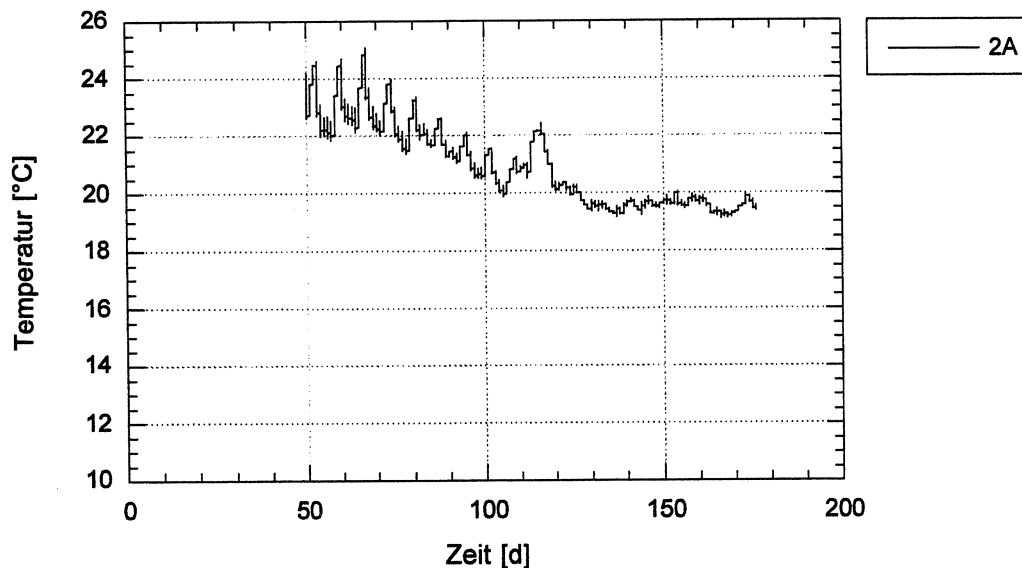


Abb. 4.12: Temperatur im Probekörper 2A

Die Probekörper wurden während der ganzen Messdauer in einem Innenraum gelagert. Die Temperatur in diesem Raum weist durch die Einstellung der Klimaanlage Schwankungen auf (Abb. 4.12). Während eines Tages variiert die Temperatur um bis zu 1 °C, über das Wochenende (grössere Peaks in der Abbildung 4.12) um bis zu 3 °C und über die ganze Messdauer um 9°C.

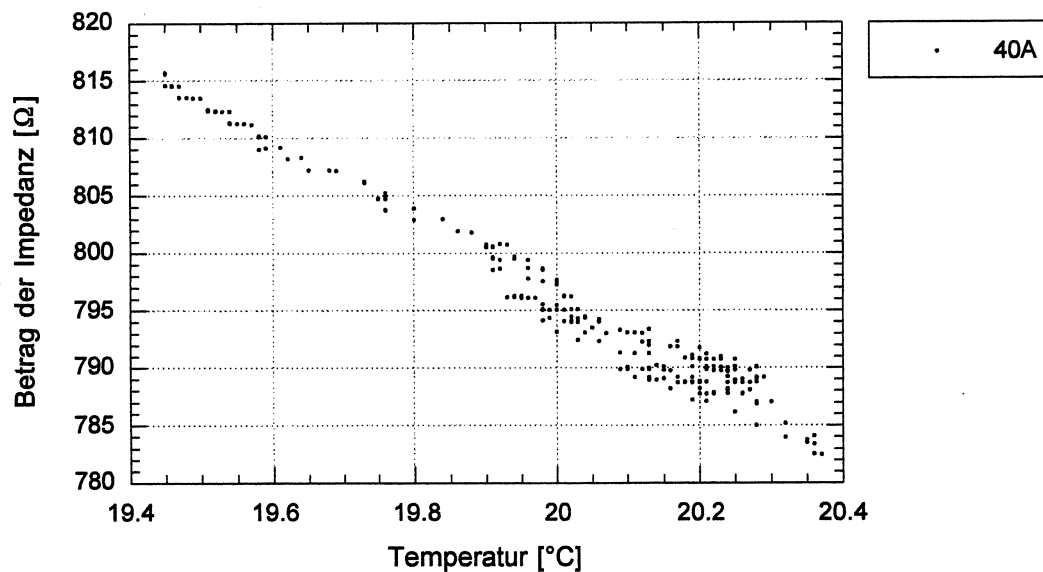


Abb. 4.13: Betrag der Impedanz des Probekörpers 40A in Abhängigkeit der Temperatur, aufgenommen während 7 Tagen (vom 123. Tag bis zum 129. Tag) mit dem Datenlogger

In Abbildung 4.13 sind die Datenpunkte Widerstand/Temperatur aufgetragen, die während einer Woche am Probekörper 40A gemessen wurden. Er ist ersichtlich, dass der Widerstand mit zunehmender Temperatur abnimmt.

4.1.7 Betonwiderstand

Der Widerstand des Betons (ohne Einbezug des Spannglieds im Hüllrohr) wurde auf drei verschiedene Arten erfasst: durch die Messung des ohmschen Widerstands zwischen den beiden Bewehrungsnetzen, mittels 4-Punkt-Messung an der Betonoberfläche und durch die Messung des Betrags der Impedanz zwischen den einzelnen Sprossen der Widerstandsleiter.

Der ohmsche Widerstand zwischen den Netzen (Abb. 4.14) hat sich während der Messdauer ungefähr verdreifacht. Die Werte variieren zwischen den einzelnen Probekörpern um ca. 20 %.

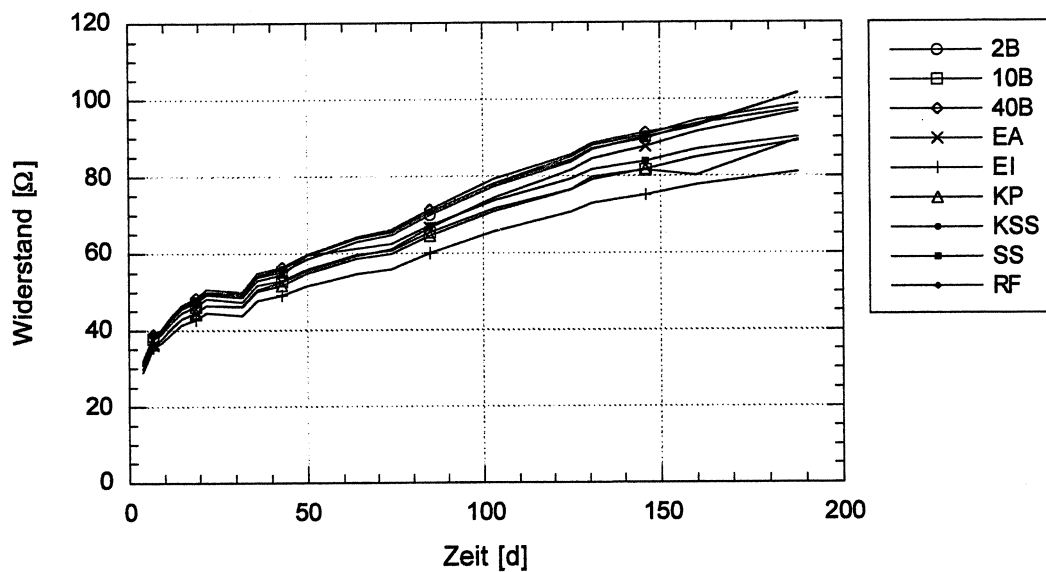


Abb. 4.14: Zeitlicher Verlauf des ohmschen Widerstands zwischen den beiden Bewehrungsnetzen, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz

In der Abbildung 4.15 sind die Messwerte zwischen den Sprossen der Widerstandsleiter im Probekörper 2A dargestellt. Die Impedanz des Betons ist seit Beginn der Messungen um den Faktor 3.5 angestiegen. Die oberste Kurve in der Abbildung entspricht dem Betrag der Impedanz zwischen den beiden untersten Sprossen.

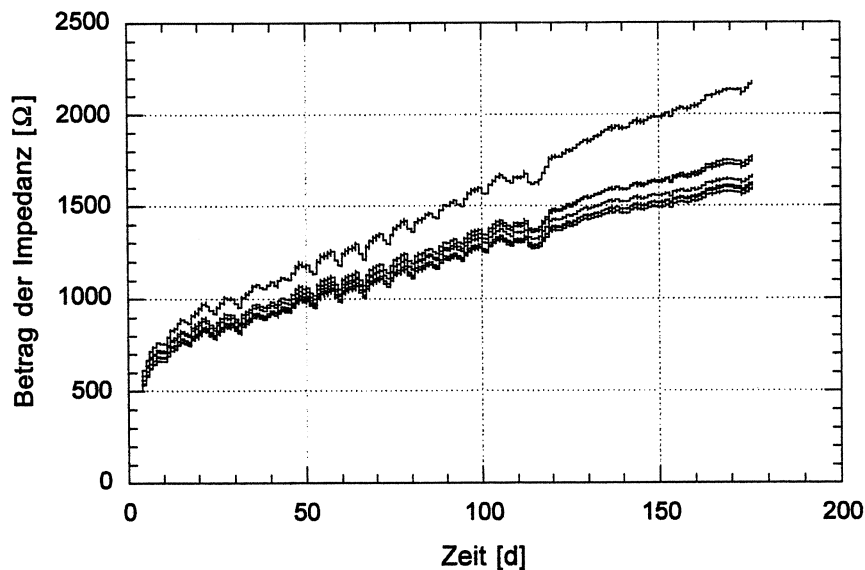


Abb. 4.15: Betrag der Impedanz zwischen den Sprossen der Widerstandsleiter im Probekörper 2A, gemessen mit dem Datenlogger

4.1.8 Lokale Befeuchtung

Der Probekörper 40B wurde während 4 Wochen im Bereich der Fehlstellen befeuchtet. Beim Betonkörper 10B hingegen wurde die Befeuchtung während 5 Wochen nicht im Bereich der Fehlstellen, sondern am Rande des Körpers angewendet. In der Tabelle 4.3 ist ersichtlich, dass die Zunahme des Widerstands der befeuchteten Probekörper im Vergleich zu dem nicht befeuchteten Probekörper 2A leicht geringer ausfällt. Am geringsten nimmt der Widerstand des im Bereich der Fehlstelle befeuchteten Probekörpers 40B zu.

Probekörper	2B	10B	40B
Ohmscher Widerstand vor Befeuchtung [kΩ] (nach 146 Tagen)	98.7	4.71	0.814
Ohmscher Widerstand nach Befeuchtung [kΩ] (nach 188 Tagen)	101.5	4.77	0.814
Prozentuale Zunahme	2.8 %	1.2 %	0 %

Tab. 4.3: Ohmsche Widerstände vor und nach Befeuchtung der Probekörper, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz

4.2 VERSUCHE IN LÖSUNG

Bei den Versuchen in Lösung wurde die Anzahl und Grösse der Löcher, der Abstand der Bewehrungsnetze zur Fehlstelle und die Länge des Hüllrohrs variiert. Der spezifische Widerstand der Lösung betrug $100 \Omega\text{m}$.

4.2.1 Messwerte bei verschiedener Lochgrösse und -anzahl

In Tabelle 4.4 sind die Resultate der Messungen am 1 Meter langen Probekörper in Lösung bei verschiedener Grösse und Anzahl der Löcher dargestellt. Der Abstand zwischen den Bewehrungsnetzen und der Fehlstelle war gleich wie bei den Probekörpern im Beton. Die Messwerte der nachfolgenden Tabelle 4.5 wurden am nur halb so langen Probekörper in Lösung aufgezeichnet.

Fehlstellen	R_{Ω} [k Ω]	D [-]	C [nF]
intaktes Hüllrohr	7000	0.010	2.25
1 Loch \varnothing 2 mm	142.9	0.484	2.28
2 Löcher \varnothing 2 mm	71.7	0.986	2.24
1 Loch \varnothing 5 mm	32.6	2.14	2.27
2 Löcher \varnothing 5 mm	18.1	3.93	2.23
1 Loch \varnothing 10 mm	12.5	5.68	2.25
2 Löcher \varnothing 10 mm	7.07	10.4	2.18
3 Löcher \varnothing 10 mm	4.25	18.6	2.0
5 Löcher \varnothing 10 mm	2.57	32.0	1.9

Tab. 4.4: Ohmscher Widerstand R_{Ω} , Verlustfaktor D und Kapazität C der Probekörper von 1 Meter Länge in Lösung, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz am linken Bewehrungsnetz

Fehlstellen	R_{Ω} [k Ω]	D [-]	C [nF]
intaktes Hüllrohr	OL	0.008	1.17
1 Loch \varnothing 2 mm	152.6	0.888	1.16
1 Loch \varnothing 5 mm	35.1	3.93	1.15
1 Loch \varnothing 10 mm	14.8	9.52	1.126
3 Löcher \varnothing 10 mm	4.83	32.0	1.04
5 Löcher \varnothing 10 mm	2.90	OL	OL

Tab. 4.5: Ohmscher Widerstand R_{Ω} , Verlustfaktor D und Kapazität C der Probekörper von 0.5 Meter Länge in Lösung, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz am linken Bewehrungsnetz (OL = Overload = Überschreiten des Messbereichs)

4.2.2 Abstand des Netzes zur Fehlstelle

Bei den Probekörpern in Lösung ist keine Abhängigkeit des Widerstands vom Abstand zur Fehlstelle ersichtlich.

Der Widerstand zwischen den beiden Bewehrungsnetzen nimmt linear mit steigendem Abstand zwischen den Netzen zu (Abb. 4.16).

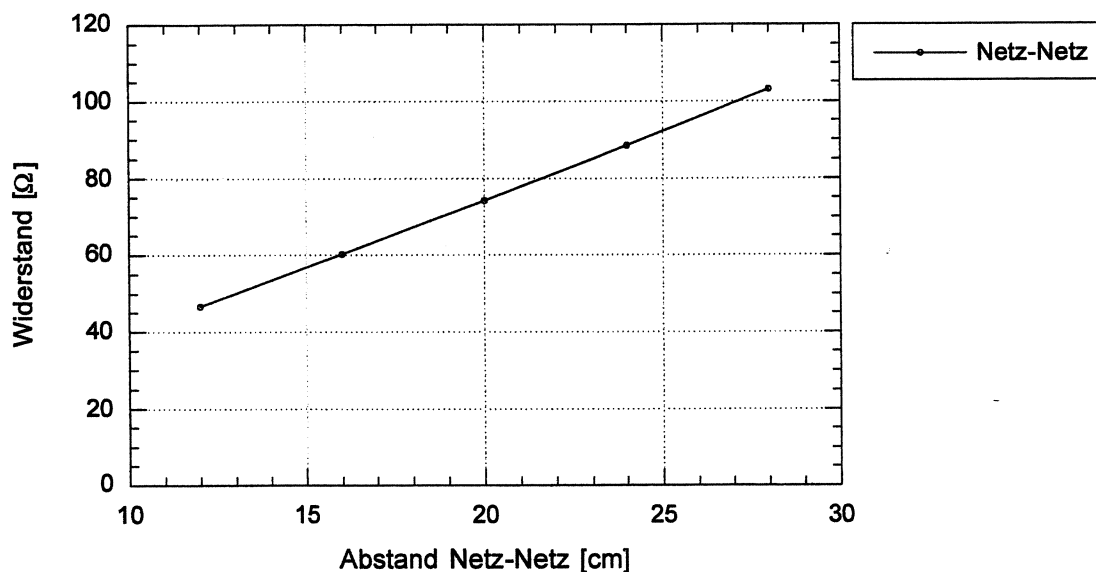


Abb. 4.16: Ohmscher Widerstand zwischen den beiden Bewehrungsnetzen in Funktion ihres Abstands, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz

Die Kapazität C und der Verlustfaktor D der Probekörper in Lösung sind bei allen Fehlstellen unabhängig vom Abstand des Netzes von der Fehlstelle.

4.3 MESSUNGEN AN PILOTOBJEKTEN

Elektrische Widerstandsmessungen wurden an verschiedenen Pilotobjekten mit elektrisch isolierten Spanngliedern seit 1993 im Auftrag des ASTRA bzw. verschiedener Kantone durchgeführt. Die derart erhobenen Daten flossen in die Erarbeitung der Richtlinie [4] ein. Zu Beginn wurden die Messungen ausschliesslich mit dem Messgerät Geohm UNILAB ausgeführt, welches nur den Betrag der Impedanz angibt, ohne Differenzierung in ohmschen und kapazitiven Widerstand. Erst im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden dann Messungen mit dem LCR Meter durchgeführt.

4.3.1 P.S. du Milieu

Tabelle 4.6 zeigt die vor und nach der Injektion gemessenen Werte des elektrischen Widerstands (Geohm, 117 Hz) zwischen Spannglied und schlaffer Bewehrung. Bei 100% Vorspannung zeigen fünf Spannglieder sehr hohe Widerstandswerte, eines ist praktisch im Kurzschluss.

Nr.	100%	Injiziert	2 Jahre	3 Jahre	8 Jahre
1	12 k Ω	OL	2.9 k Ω	1.9 k Ω	4.3 k Ω
2	79 k Ω	OL	5.1 k Ω	4.5 k Ω	6.1 k Ω
3	17 k Ω	OL	5.6 k Ω	1.9 k Ω	6.9 k Ω
4	29 k Ω	OL	5.8 k Ω	5.4 k Ω	6.7 k Ω
5	95 k Ω	OL	6.8 k Ω	6.9 k Ω	7.9 k Ω
6	30 Ω	0.5 Ω	1.5 Ω	0.9 Ω	6.3 Ω

Tab. 4.6: Elektrischer Widerstand der Spannglieder in der Brücke P.S. du Milieu gegen die schlaffe Bewehrung vor und nach der Injektion. Geohm, 117 Hz.

Nr.	R Geoh	R 1kHz	C 1kHz	D 1kHz	R 120	C 120	D 120
1	4.33	7.23	234.0	0.093	8.81	239.4	0.618
2	6.11 k Ω	13.7	233.0	0.048	18.59	237.3	0.295
3	6.91 k Ω	20.87	235.0	0.032	32.2	239.1	0.167
4	6.71 k Ω	17.81	237.2	0.037	27.53	241	0.196
5	7.95 k Ω	28.25	234.7	0.023	66.0	239.7	0.082
6	6 Ω	6 Ω	-	28.5	6	-	55.5

Tab. 4.7: Ohmscher Widerstand, Kapazität und Verlustfaktor der Spannglieder in der Brücke P.S. du Milieu gegen die schlaffe Bewehrung. Zeitpunkt ca.

8 Jahre nach Injektion. Messgerät LCR 1 kHz und 120 Hz

Nach der Injektion ist Spannglied Nr. 6 mit der schlaffen Bewehrung kurzgeschlossen, die andern fünf Spannglieder sind vollständig isoliert (Messwert $> 200 \text{ k}\Omega$, ev. Messfehler). Die Widerstandsentwicklung über die Jahre zeigt einen ansteigenden Trend, der Durchschnittswert der nicht kurzgeschlossenen Spannglieder 8 Jahre nach der Injektion liegt bei ca. $6.5 \text{ k}\Omega$.

Auch die Messungen mit dem LCR Meter (Frequenz 1 kHz und 120 Hz) bestätigen die mit dem Geohm erhaltenen Aussagen. Die Kapazität der Kunststoffhüllrohre ist sehr reproduzierbar, sie beträgt $235 \pm 2 \text{ nF}$. Die gemessenen rein ohmschen Widerstände (R 1kHz und R 120 Hz) sind höher als die vom Geohm gemessenen elektrischen Widerstände. Die Verlustfaktoren bei 1 kHz liegen zwischen 0.023 (Spannglied Nr. 5) und 0.093 (Spannglied Nr. 1). Beim kurzgeschlossenen Spannglied Nr. 6 kann auch das LCR Meter keine sinnvollen Werte für die Kapazität und den ohmschen Widerstand angeben.

4.3.2 Brücke Burg-Aderahubel

Tabelle 4.8 zeigt die vor und nach der Injektion gemessenen Werte des elektrischen Widerstands (Geohm, 117 Hz). Bei 60% Vorspannung sind drei Spannglieder bereits im elektrischen Kontakt mit der Bewehrung, bei 100% Vorspannung sogar fünf. Dies ändert sich nach der Injektion nur geringfügig. Die Widerstandsentwicklung zeigt dass bei Spannglied 4 und 5 ein Trend zum Ansteigen besteht, wobei die Absolutwerte stets relativ tief liegen.

Nr.	60%	100%	Injiziert	2 Jahre	3 Jahre	8 Jahre
1	12.0	1.8	2.4	1.3	0.7	2.8
2	0.65	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
3	0.9	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2
4	OL	0.2	465	1740	1650	2700
5	OL	0.2	30	670	260	480
6	OL	45	0.5	0.3	0.3	0.2

Tab. 4.8: Ohmscher Widerstand der Spannglieder in der Brücke Burg-Aderahubel gegen die schlaffe Bewehrung vor und nach der Injektion. Geohm, 117 Hz.

Die Vergleichsmessungen Geohm und LCR Meter (Tabelle 4.9) zeigen identische Werte für den ohmschen Widerstand, der Kurzschluss auf den Kabeln 1 - 3 und 6 wird bestätigt. Nur die nicht kurzgeschlossenen Spannglieder Nr. 4 und 5 ergeben sinnvolle Kapazitätswerte. Die Verlustfaktoren liegen alle sehr hoch.

Nr.	R Geoh	R 1kHz	C 1kHz	D 1kHz	R 120	C 120	D 120
1	0.003	0.003	-	15.6	0.003	-	47
2	0.0002	0.0003	-	1.37	0.0002	-	6.2
3	0.0002	0.0002	-	1.34	0.0002	-	6.3
4	2.7	2.8	223	0.25	4.05	243	1.32
5	0.435	0.530	229	1.28	0.578	288	7.7
6	0.0002	0.0003	-	1.31	0.0002	-	5.7

Tab. 4.9: Ohmscher Widerstand, Kapazität und Verlustfaktor der Spannglieder in der Brücke Burg Aderahubel gegen die schlaffe Bewehrung. Länge ca. 60 m, Ø 100 mm. Zeitpunkt ca. 8 Jahre nach Injektion. Messgerät LCR 1 kHz und 120 Hz

4.3.3 P.S. Pré du Mariage

An der erst 1997 erstellten Ueberführung Pré du Mariage wurden vor allem während des Bauvorgangs und nach der Injektion Messungen in kurzen Abständen aufgeführt (Daten Firma VSL). Es zeigt sich, dass nach dem Vorspannen sehr hohe Werte des elektrischen Widerstands gemessen werden, d.h. die eingelegten und gespannten Spannstähle sind isoliert. Unmittelbar nach der Injektion (Injektionsgut ist noch flüssig) fällt der Widerstand auf Werte von ca. 100 Ohm ab, steigt aber innert weniger Tagen bereits auf mehrere kOhm an. Nach drei Jahren zeigen alle Spannglieder sehr hohe elektrische Widerstände. Abb. 4.17 zeigt den Verlauf des elektrischen Widerstands über die Zeit, es ist deutlich ersichtlich, wie der elektrische Widerstand kontinuierlich ansteigt.

Nr.	100%	Injiziert	7 Tage	60 Tage	1 Jahr	3 Jahre
1	121	0.05	1.05	3.7	3.0	6.2
2	122	0.15	0.9	3.2	2.6	5.5
3	120	0.3	1.5	3.2	2.7	7.5
4	119	0.2	1.1	1.9	3.3	11.1
5	115	0.05	2.2	3.8	6.0	11.0
6	118	0.05	1.3	3.2	3.9	8.8

Tab. 4.10: Ohmscher Widerstand der Spannglieder in der Brücke Pré du Mariage gegen die schlaffe Bewehrung vor und nach der Injektion. Geohm, 117 Hz.

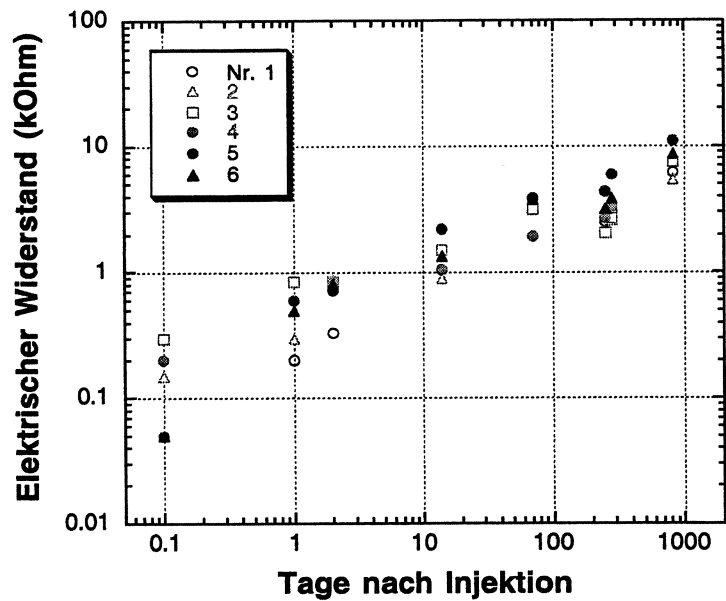


Abb. 4.17: Zeitlicher Verlauf des elektrischen Widerstands an den sechs Spanngliedern der Brücke Pré du Mariage. Geohm, 117 Hz. Daten VSL.

Nr.	R Geoh	R 1kHz	C 1kHz	D 1kHz	R 120	C 120	D 120
1	6.18	7.50	103.4	0.20	8.66	110.2	1.36
2	5.47	5.5	102.5	0.279	7.70	112.8	1.5
3	7.46	9.83	104.1	0.152	11.7	110.1	1.01
4	11.1	17.48	105.1	0.084	23.06	109.6	0.515
5	11.05	17.95	105.3	0.082	25.56	111.1	0.459
6	8.75	12.34	103.8	0.121	16	110.9	0.734

Tab. 4.11: Ohmscher Widerstand, Kapazität und Verlustfaktor der Spannglieder in der Brücke Pré du Mariage gegen die schlaffe Bewehrung. Länge ca. 49.3 m, 0 76 mm. Zeitpunkt ca. 4 Jahre nach Injektion. Messgerät LCR 1 kHz und 120 Hz

Die an der Brücke Pré du Mariage gemessenen Kapazitätswerte sind gut reproduzierbar, sie streuen weniger als 2%. Die Verlustfaktoren liegen zwischen 0.082 und 0.28, damit eher hoch, was auf kleine Defekte hinweist.

5 DISKUSSION

5.1 HYDRATATION UND AUSTROCKNUNG DES BETONS UND WASSERAUFNAHME DES HÜLLROHRS

In der Abbildung 5.1 sind die Werte des ohmschen Widerstands im Ausgangszustand auf 1 normiert. Es ist ersichtlich, dass bei den Probekörpern mit Löchern (2B, 10B und 40B) eine ähnliche Zunahme des elektrischen Widerstands über die Zeit stattfindet. Bei diesen Probekörpern besteht eine durchgehende elektrolytische Verbindung vom Spannkabel zum Bewehrungsnetz über den Beton und das Injektionsgut. Weil der ohmsche Widerstand des Hüllrohrs um mehrere Grössenordnungen höher ist als derjenige des Betons und des Injektionsguts, wird der Widerstand der Fehlstelle (Abschnitt 2.4.2) massgebend, und dieser ist linear abhängig vom elektrischen Widerstand des Betons bzw. des Injektionsguts. Die Zunahme der Widerstände der Probekörper mit Löchern um den Faktor 1.8 bis 2 des Ausgangswerts kann somit auf die Hydratation und in geringerem Ausmass auf das Austrocknen des Betons zurückgeführt werden.

Der elektrische Widerstand der Probekörper mit intakten Hüllrohren KP, KSS, SS und RF nehmen während der Messdauer im Gegensatz zu den Probekörpern mit Löchern um bis zu 14 % ab. Dadurch, dass bei diesen Körpern keine direkte elektrolytische Verbindung über den Beton und dem Injektionsgut besteht, wird der elektrische Widerstand über die Kette Spannstahl / Injektionsgut / Hüllrohr / Beton / Bewehrungsnetz gemessen. Die einzelnen Widerstände dieser Kette können somit als in Serie geschaltet betrachtet werden. Der Gesamtwiderstand zwischen Spannstahl und Bewehrungsnetz wird durch den Widerstand des Hüllrohrs bestimmt, denn dieser ist um Grössenordnungen höher als die restlichen Einzelwiderstände. Kunststoffe haben in einer feuchten Umgebung die Eigenschaft, Wassermoleküle aufzunehmen. Dadurch nimmt das Hüllrohr Wasser aus dem Beton auf. Weil Wasser eine rund 35 mal höhere Dielektrizitätszahl als Polypropylen aufweist, erhöht sich die Kapazität geringfügig (siehe Gleichung 2.32). Durch die Erhöhung der Kapazität nimmt der kapazitive Widerstand des Hüllrohrs ab (Gleichung 2.11). Weil wir eine Serieschaltung des ohmschen Widerstands des Betons R_W und des kapazitiven Widerstands des Hüllrohrs R_C haben, nimmt auch der gemessene Betrag der Impedanz (Gleichung 2.18) und die Phasenverschiebung (Gleichung 2.20) ab.

Weil das LCR-Meter nicht den Betrag der Impedanz und die Phasenverschiebung angibt, sondern den ohmschen Widerstand einer Parallelschaltung mit einem kapazitiven Widerstand, ist noch die Gleichung 3.9 zu betrachten: Durch die Abnahme von $|Z|$ und j nimmt auch der gemessene und in der Abbildung 5.1 dargestellte Wert ab.

An Feldobjekten konnte diese Abnahme nicht beobachtet werden, da LCR Messungen kurz nach der Injektion fehlen.

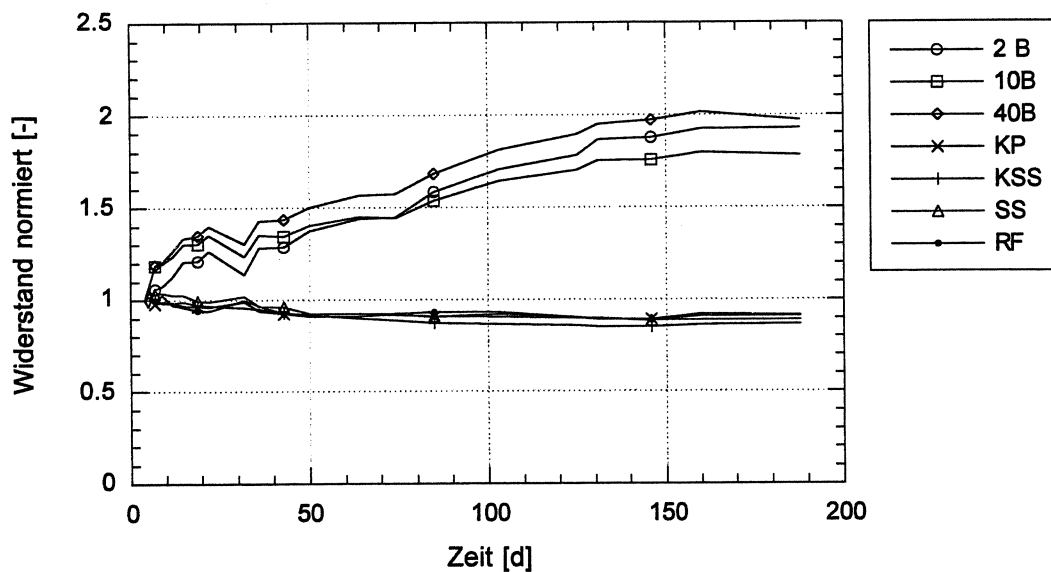


Abb. 5.1: Normierter ohmscher Widerstand über die Zeit am linken Netz

Die auf den Ausgangszustand normierten ohmschen Widerstände der Probekörper mit Entlüftungsröhrchen EA und EI sind im Vergleich zu den anderen Probekörper stärker angestiegen, insbesondere derjenige von EA (Abbildung 5.2). Die beiden Betonkörper sind mit einem Entlüftungsröhrchen ausgestattet, das von einem nicht zusätzlich abgedichteten Schraubdeckel verschlossen ist (Abb. 3.2). Das aus dem Beton herausragende Entlüftungsröhrchen des Probekörpers EA ist durch das Betonieren mit einer Zementsteinschicht überzogen worden. Eine Erklärung für den grossen Anstieg des Widerstands am Körper EA könnte folgende sein: Die Zementsteinschicht auf dem Entlüftungsröhrchen und das Injektionsgut zwischen Schraubdeckel und Entlüftungsröhrchen bilden eine elektrolytische Verbindung zwischen dem Injektionsgut und dem Beton des Körpers. Diese elektrolytische Verbindung bestimmt den Widerstand zwischen Spannkabel und Bewehrungsnetz. Durch das Austrocknen der Zementsteinschicht erhöht sich dieser Widerstand. Wegen der geringen Tiefe dieser Schicht trocknet diese viel schneller aus als der Beton im Innern des Probekörpers. Dadurch weist der ohmsche Widerstand von EA einen grösseren Anstieg auf als bei den anderen Betonkörpern.

An den Pilotobjekten wurde ebenfalls ein deutlicher Einfluss der Hydratation und des Austrocknens gefunden; das Beispiel Pré du Mariage zeigt deutlich den asymptotischen Anstieg der Widerstandswerte (Abb. 4.17).

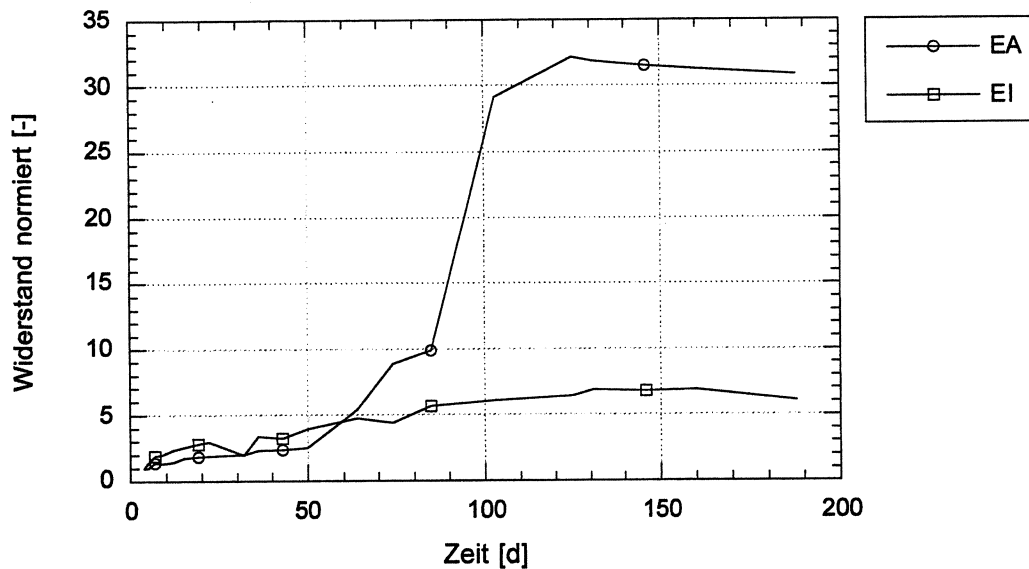


Abb. 5.2: Normierter ohmscher Widerstand der Probekörper EA und EI am linken Netz

5.2 EINFLUSS DER TEMPERATUR

Um die Widerstände, die bei verschiedenen Temperaturen gemessen wurden, miteinander zu vergleichen, kann die Gleichung 2.31 verwendet werden. Die Widerstände können dadurch in Werte umgerechnet werden, die den Widerständen bei einer Temperatur von 20 °C entsprechen. Für diese Transformation ist jedoch der Wert des Exponenten b erforderlich. Dieser wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Um zu verhindern, dass dieser Exponent auch den Einfluss der Hydratation und des Austrocknens enthält, wird er nicht mit dem Datensatz der ganzen Messdauer bestimmt, sondern jeweils nur mit den Daten, die während einer Woche aufgenommen wurden.

Aus Abbildung 5.3 ist ersichtlich, dass der Exponent b anfänglich ansteigt, sich später aber über die Zeit nicht mehr stark verändert. Der Durchschnitt der in dieser Abbildung enthaltenen Werte beträgt 2980 K. Mit diesem Wert und der Gleichung 2.31 werden die Widerstände in Werte umgerechnet, die dem Widerstand bei 20 °C entsprechen. Vergleicht man den Exponenten mit Literaturwerten [5], so zeigt sich eine gute Übereinstimmung: an Mörtelprüfkörpern bei ca. 85% relativer Luftfeuchtigkeit wurde ein Wert von 3080 K bestimmt. Höhere Feuchtigkeiten führen zu tieferen b -Werten (100% 2300 K), trockenere Verhältnisse (60 % 3500 K) zu höheren Werten.

In Abbildung 5.4 ist das Resultat dieser Temperaturkompensation auf 20 °C, d.h. die Umrechnung der Werte mit der Gleichung 2.31, dargestellt. Durch Anwendung dieser Gleichung werden die Tages- und Wochenschwankungen des Widerstands geglättet, und die Steigung der Werte über die ganze Messdauer wird geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur über die ganze Messdauer um 4 °C abgenommen hat.

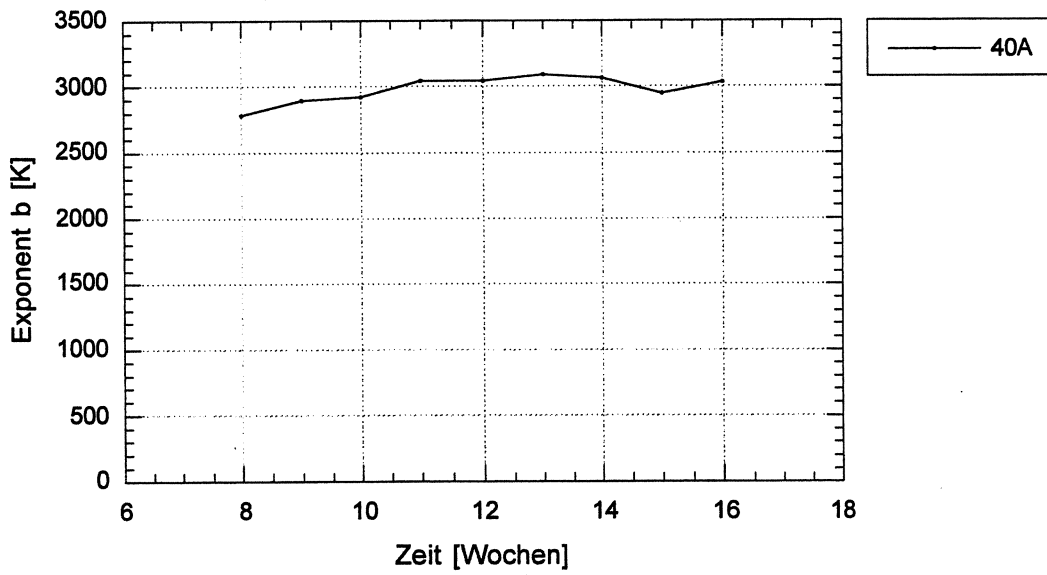


Abb. 5.3: Exponent b über der Zeit, bestimmt am Probekörper 40A

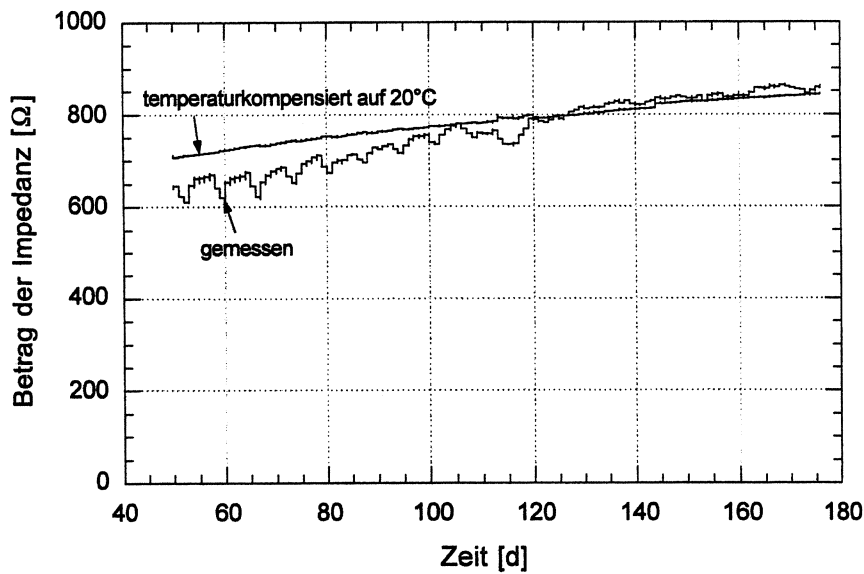


Abb. 5.4: Betrag der Impedanz des Probekörpers 40A, gemessen mit dem Datenlogger und temperaturkompensiert auf 20 °C mit der Gleichung 2.31. b Wert 2980 K

5.3 EINFLUSS DER FEHLSTELLEN

Die Probekörper KP, KSS und SS haben einen ähnlichen ohmschen Widerstand wie der Probekörper RF mit dem intakten Hüllrohr (Tab. 4.1). Das heisst, dass die im VSL Plus System verwendeten Kupplungen und spiegelgeschweissten Hüllrohrverbindungen nicht als Fehlstellen zu betrachten sind, sondern die gleiche Dichtigkeit wie das intakte Hüllrohr aufweisen.

Dieser Sachverhalt ist auch in den Impedanzspektren ersichtlich, denn die Probekörper KP, KSS, SS und RF (Abbildung 4.9) weisen alle die gleiche Charakteristik auf: einen linearen Anstieg der Impedanz mit abnehmender Frequenz in der logarithmischen Darstellung und einen Wert der Phasenverschiebung nahe bei -90° . Bei einem rein kapazitiven Widerstand beträgt die Phasenverschiebung genau -90° , somit kann das Verhalten dieser Probekörper als annähernd rein kapazitiv bezeichnet werden.

In der Abbildung 5.5 werden die Impedanzspektren aller Betonprobekörper verglichen. Der waagrechte Verlauf der Kurven charakterisiert den ohmschen Widerstand, da dieser Wert unabhängig von der Messfrequenz ist. An den unterschiedlichen vertikalen Lagen dieser horizontalen Plateaus sind die verschiedenen ohmschen Widerstände der Fehlstellen ersichtlich. Bei den Probekörpern 40B und 10B ist der Betrag der Impedanz bei den Frequenzen des LCR-Meters - 120 Hz und 1 kHz - nahezu identisch, währenddem sich diese beiden Werte bei den anderen Betonkörpern unterscheiden (siehe auch Abb. 4.6 und 4.7). Bei hohen Frequenzen gehen die Messkurven aller Probekörper in diejenige von RF, dem Körper mit dem intakten Hüllrohr, über. Das bedeutet, dass an allen Körpern bei hohen Frequenzen der kapazitive Widerstand des Hüllrohrs massgebend wird.

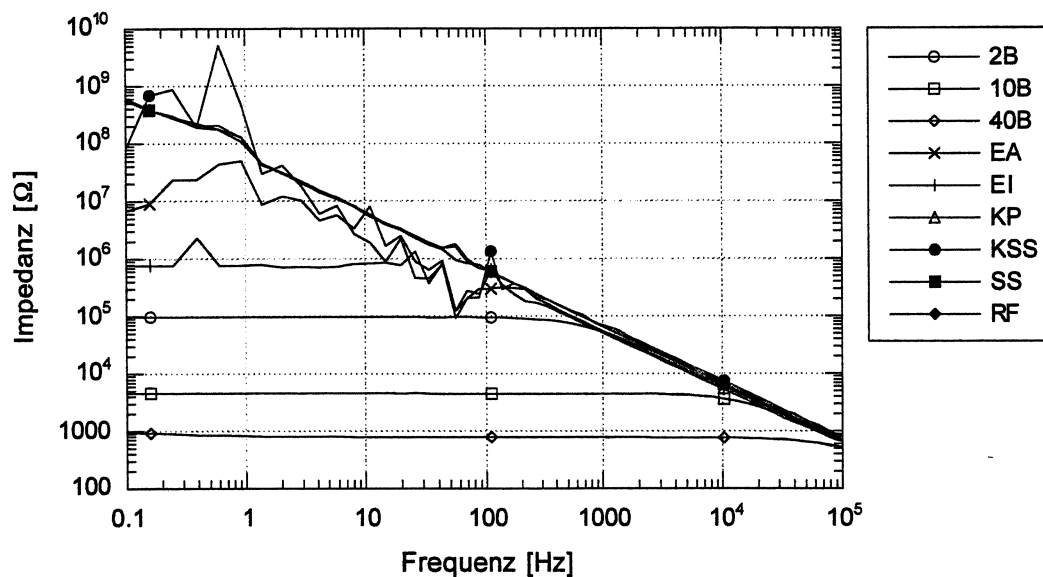


Abb. 5.5: Vergleich der Impedanzspektren aller Labor Betonprobekörper, aufgenommen nach 125 Tagen

Der tiefere Wert der Kapazität am Probekörper KSS (Abschnitt 4.1.5) lässt sich durch den Einfluss des Schrumpfschlauchs erklären: Die Wanddicke des Hüllrohrs wird durch die Ap-

plikation des Schrumpfschlauchs erhöht, dadurch wird gemäss Gleichung 2.32 die Kapazität vermindert.

5.4 EINFLUSS DER MESSGERÄTE UND -FREQUENZ

5.4.1 Impedanzmessanlage Zahner IM6

Diese Anlage ist im Gegensatz zum LCR-Meter und dem Erdungsmessgerät, die als Handmessgeräte für den mobilen Einsatz konzipiert sind, ein präzises Labormessgerät, welches das ganze Frequenzspektrum bestimmen kann. Dadurch wird dieses Messgerät als Referenz für die anderen Geräte erklärt.

5.4.2 Erdungsmessgerät Unilap Geo

Dieses Messgerät wurde häufig für Feldmessungen verwendet. Sein Messbereich ist auf 200 kOhm beschränkt, was für die nur 1 m langen Laborprobekörper ohne Verletzungen nicht ausreichte (Tab.4.1), für Feldmessungen an Brücken mit Kunststoffhüllrohren jedoch kein Problem darstellte (Tab. 4.6, 4.8, 4.9).

Dieses Gerät bestimmt lediglich den Betrag der Impedanz (elektrischer Widerstand) bei einer fixen Messfrequenz von 111 Hz, weder die Phasenverschiebung noch der Verlustfaktor wird angegeben. Damit kann der ohmsche Widerstand (der Verletzungen) nicht vom kapazitiven Widerstand des Hüllrohrs unterschieden werden, was vor allem bei langen Kabeln eine grosse Rolle spielt (der gemessene kapazitive Widerstand sinkt proportional zur Länge des Kabels).

5.4.3 LCR-Meter Escort ELC-131 D

Die Genauigkeit dieses Geräts wurde mit Hilfe eines Schaltkreises aus elektronischen Bauteilen überprüft. Dabei wurde ein ohmscher Widerstand mit bekanntem Widerstandswert R und ein Kondensator mit bekannter Kapazität C parallel oder in Serie geschaltet. Bei den Kontrollmessungen resultierte eine sehr gute Übereinstimmung von R und R_{Ω} mit einer maximalen Abweichung von 0.4 %. Die Kapazitätsmessung des LCR-Meters wurde an Kondensatoren mit bekannten Kapazitätswerten überprüft, es ergaben sich Abweichungen der vom LCR-Meter angezeigten Kapazität und der tatsächlichen Kapazität des Bauteils von bis zu 15 %.

In der Tabelle 5.1 werden für die Laborprüfkörper die Messwerte des LCR-Meters mit denjenigen der Impedanzmessanlage verglichen. Der ohmsche Widerstand R_{Ω} und der Verlustfaktor D wurden mit dem LCR-Meter an den Betonprobekörpern nach 160 Tagen gemessen. Zum gleichen Zeitpunkt wurde mit der Impedanzmessanlage der Betrag der Impedanz $|Z|$ und der Phasenwinkel j an den gleichen Probekörpern aufgenommen. Anschliessend wurde mit R_{Ω} und D anhand der Gleichungen 3.6 und 3.7 die Werte $|Z|_{LCR}$ und j_{LCR} ausgerechnet. $|Z|_{LCR}$ entspricht dem mit dem LCR-Meter bestimmten Betrag der Impedanz und j_{LCR} die dazugehörige Phasenverschiebung. Beim Betrag der Impedanz beträgt die maximale Abwei-

chung des Werts des LCR-Meters von jenem der Impedanzmessanlage 18 %, beim Phasenwinkel beläuft sich die maximale Abweichung auf 16.7 %.

Probekörper Messfrequenz	R_{Ω} [Ω]	D [-]	$ Z _{LCR}$ [k Ω]	$ Z $ [k Ω]	Abweichung $ Z _{LCR}$ von $ Z $ [%]
10B 1 kHz	4.81E+03	13.8	4.80	4.75	1.0
10B 120 Hz	4.84E+03	111.0	4.84	4.80	0.8
2B 1 kHz	1.01E+05	0.654	55.4	52.4	5.8
2B 120 Hz	1.05E+05	5.07	102.6	103.2	-0.6
EI 1 kHz	5.82E+05	0.097	56.2	48.9	14.8
EI 120 Hz	8.50E+05	0.534	400.4	399.8	0.1
EA 1 kHz	1.14E+06	0.053	60.3	52.3	15.4
KSS 1 kHz	2.40E+06	0.034	81.6	75.3	8.3
KP 1 kHz	3.10E+06	0.022	68.2	57.8	18.0
RF 1 kHz	3.70E+06	0.018	66.6	63.2	5.4
SS 1 kHz	3.90E+06	0.017	66.3	62.5	6.1

Probekörper Messfrequenz	φ_{LCR} [°]	φ [°]	Abweichung φ_{LCR} von φ [%]
10B 1 kHz	-4.14	-4.66	(11.1)
10B 120 Hz	-0.52	-0.62	(16.7)
2B 1 kHz	-56.8	-58.7	3.2
2B 120 Hz	-11.2	-9.9	-12.7
EI 1 kHz	-84.5	-85.3	1.0
EI 120 Hz	-61.9	-54.8	-13.0
EA 1 kHz	-87.0	-87.0	0.0
KSS 1 kHz	-88.1	-86.1	-2.3
KP 1 kHz	-88.7	-88.3	-0.5
RF 1 kHz	-89.0	-87.0	-2.3
SS 1 kHz	-89.0	-87.1	-2.2

Tab. 5.1: Vergleich der Messwerte des LCR-Meters und der Impedanzmessanlage, die Werte wurden nach 160 Tagen aufgenommen (die in Klammern gesetzten Werte sind nicht repräsentativ, da es sich um Differenzen kleiner Zahlen handelt, die im Bereich der Messungenauigkeit liegen)

Die teilweise stark unterschiedlichen Werte bei der Messung mit den Frequenzen 1 kHz und 120 Hz an den Betonkörpern lassen sich auf das kapazitive Verhalten des Hüllrohrs (siehe Abschnitt 5.3) zurückführen: je intakter das Hüllrohr desto grösser die Differenzen.

In den Messungen an Pilotobjekten wurde dasselbe Verhalten festgestellt (Abb. 5.6): je höher der mit dem Geohm gemessene Wert der Impedanz (d.h. je besser der Zustand des Spannglieds) desto grösser war die Differenz zwischen den Messwerten bei 1 kHz und 120 Hz (Tab. 4.7). Die starke Zunahme des mit dem LCR Meter gemessenen Widerstands ist darauf zurückzuführen dass das Messinstrument Geohm einen integralen elektrischen Widerstand bestimmt, der auch den kapazitiven Teil der Impedanz des Hüllrohrs enthält.

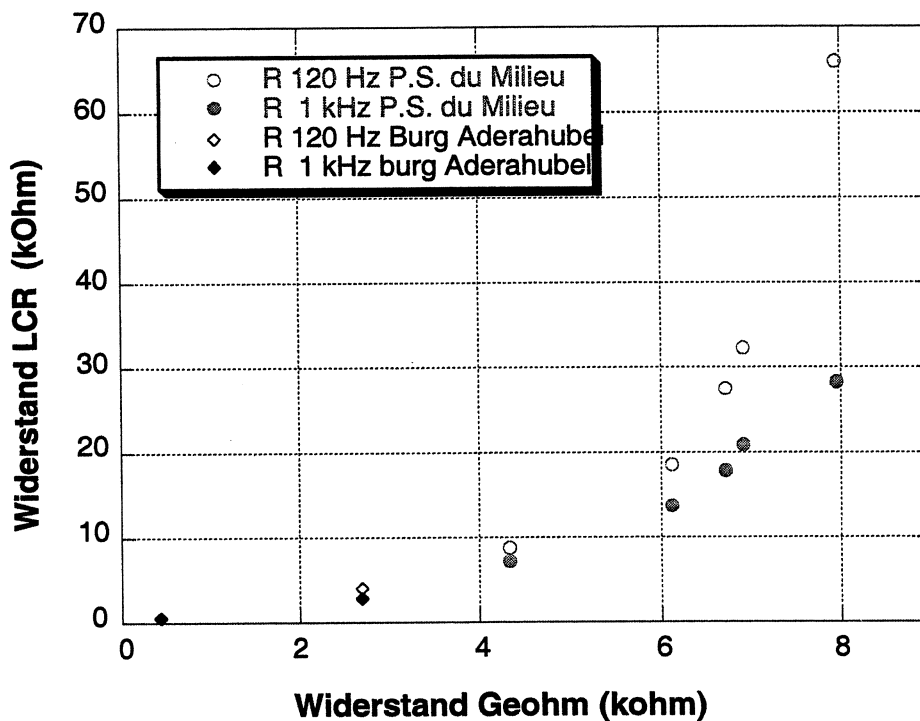


Abb. 5.6: Ohmscher Widerstand gemessen mit LCR Meter bei 120 Hz und 1 kHz vs den elektrischen Widerstand gemessen mit Geohm (107 Hz) an Kabeln der Brücken P.S. du Milieu (1 - 5) und Burg Aderahubel (4, 5).

5.5 VERSCHIEDENE ANZAHL LÖCHER UND HÜLLROHRLÄNGEN

Das Verhalten des Widerstands bei einer unterschiedlichen Anzahl Löcher und bei 2 verschieden langen Hüllrohren wurde mit den Probekörpern in Lösung ermittelt. Es wurde die Annahme untersucht, dass die Widerstände der einzelnen Löcher und der einzelnen Hüllrohrabschnitte parallelgeschaltet sind.

5.5.1 Gleiche Hüllrohrlänge und verschiedene Anzahl Löcher

Bei einer Parallelschaltung von n gleich grossen Lochwiderständen R_F ist der gemessene Gesamtwiderstand R_Ω wie folgt bestimmt:

$$\frac{1}{R_\Omega} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_F} = \frac{n}{R_F} \quad (5.1)$$

Zum Vergleich der Messungen mit verschiedener Anzahl Löcher wird aus dem gemessenen Gesamtwiderstand R_Ω der Widerstand eines Lochs R_F ausgerechnet:

$$R_F = n R_\Omega \quad (5.2)$$

Bei Gültigkeit des Parallelmodells ist R_F bei verschiedener Anzahl Löcher gleich gross. Wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich ist, stimmen die Werte von R_F gut überein.

Weil in dem vom LCR-Meter angezeigten Wert R_Ω nur der ohmsche Widerstand enthalten ist, hat der kapazitive Widerstand des Hüllrohrs keinen Einfluss auf den Gesamtwiderstand R_Ω einer Parallelschaltung. Bei der Betrachtung des Verlustfaktors ist der kapazitive Widerstand des Hüllrohrs jedoch mit einzubeziehen. Der Verlustfaktor bei einer Parallelschaltung ist gemäss Gleichung 2.26 durch den negativen Quotienten aus dem ohmschen und dem kapazitiven Widerstand definiert. Der Lochwiderstand ist gemäss Abschnitt 2.4.2 rein ohmsch und der Widerstand des Hüllrohrs nach Abschnitt 5.3 annähernd rein kapazitiv. Die Änderung des kapazitiven Hüllrohrwiderstands durch Erzeugung der Löcher mit 10 mm Durchmesser wird vernachlässigt, da die Wandfläche des Hüllrohrs nur minim abnimmt. Der ohmsche Widerstand aller Löcher R_Ω ändert sich mit zunehmender Anzahl Löcher n gemäss der obenstehenden Gleichung 5.2. Dadurch ist der gemessene Verlustfaktor an einem Hüllrohr mit n gleich grossen Löchern bestimmt durch:

$$D = -\frac{Z_C}{R_\Omega} = -\frac{n Z_C}{R_F} \quad (5.3)$$

Um zu überprüfen, ob das Verhalten des Verlustfaktors der Parallelschaltung der Lochwiderstände entspricht, wird aus dem gemessenen Verlustfaktor D am Hüllrohr mit n Löchern der Wert D_{1L} ausgerechnet, der dem Verlustfaktor des gleichen Hüllrohrs mit nur einem Loch entspricht:

$$D_{1L} = \frac{Z_C}{R_F} \quad (5.4)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 5.3 in Gleichung 5.4 folgt:

$$D_{1L} = \frac{D}{n} \quad (5.5)$$

Bei Gültigkeit des Parallelmodells ist D_{1L} bei verschiedener Anzahl Löcher gleich gross. Wie aus Tabelle 5.2 ersichtlich ist, trifft diese Annahme sehr gut zu. Die Abweichung des höchsten vom tiefsten Wert von D_{1L} beträgt 12 %.

	R_Ω [k Ω]	R_F [k Ω]	D [-]	D_{1L} [-]
1 Loch \varnothing 10 mm	12.5	12.5	5.7	5.7
3 Löcher \varnothing 10 mm	4.25	12.75	18.6	6.2
5 Löcher \varnothing 10 mm	2.56	12.8	32.0	6.4

Tab. 5.2: Gesamtwiderstand R_Ω und berechneter Widerstand R_F eines Lochs, gemessener Verlustfaktor D und berechneter Wert D_{1L} , der dem Verlustfaktor des Hüllrohrs mit nur einem Loch entspricht, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz an einem Probekörper in Lösung

5.5.2 Gleiche Anzahl Löcher und verschiedene Hüllrohrlänge

Weil in dem vom LCR-Meter angezeigten Wert R_Ω nur der ohmsche Widerstand enthalten ist, hat der kapazitive Widerstand des Hüllrohrs keinen Einfluss auf den Gesamtwiderstand R_Ω einer Parallelschaltung. Aus diesem Grund sollte die Länge des Hüllrohrs bei gleicher Anzahl und Grösse der Löcher keinen Einfluss auf den gemessenen Gesamtwiderstand R_Ω haben. In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der Messungen an zwei verschiedenen Hüllrohr-längen dargestellt. Es wurde der Quotient gebildet aus dem ohmschen Widerstand $R_{\Omega 1m}$, der am 1 Meter langen Hüllrohr aufgenommen wurde, und dem Widerstand $R_{\Omega 0.5m}$, der am 0.5 Meter langen Hüllrohr gemessen wurde.

Bei Gültigkeit des Parallelmodells sollte sich der Verlustfaktor bei einer Verdoppelung der Hüllrohrlänge halbieren. Dies kann aus der Definition des Verlustfaktors (Gleichung 2.26) abgeleitet werden, denn der ohmsche Lochwiderstand ändert sich durch die gleiche Anzahl und Grösse der Löcher nicht. Das Verhalten des kapazitiven Hüllrohrwiderstands kann durch die Betrachtung der Kapazitätsmessung (Tabelle 5.4) abgeleitet werden: Die Kapazität des Hüllrohrs ist proportional zu dessen Länge. Dadurch halbiert sich gemäss Gleichung 2.11 bei

doppelt so grosser Länge des Hüllrohrs dessen kapazitiver Widerstand. Dies wird sehr genau bestätigt (Tab. 5.4).

Aufgrund der Messresultate in Tabelle 5.4 scheint eine Parallelschaltung von der (kapazitiven) Impedanz des Hüllrohrs mit dem (ohmschen) Widerstand der Löcher plausibel zu sein. Weil der Lochdurchmesser in der Gleichung 2.33 zur Berechnung des Lochwiderstands im Quadrat enthalten ist, könnte eine leicht verschiedene Lochgeometrie an den beiden Probekörpern die Ursache für die Abweichungen vom modellierten Verhalten sein.

Fehlstelle	Hüllrohrlänge [m]	R_{Ω} [k Ω]	$R_{\Omega 1m}/R_{\Omega 0.5m}$ [-]	D [-]	$D_{1m}/D_{0.5m}$ [-]
Loch \varnothing 2 mm	1	142.2	0.93	0.484	0.54
	0.5	152.6		0.888	
Loch \varnothing 5 mm	1	32.6	0.93	2.14	0.54
	0.5	35.1		3.93	
Loch \varnothing 10 mm	1	12.6	0.85	5.68	0.59
	0.5	14.8		9.52	

Tab. 5.3: Ohmscher Widerstand und Verlustfaktor an Hüllrohren mit der Länge 1 und 0.5 Meter, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz an Probekörpern in Lösung

Fehlstelle	Hüllrohrlänge [m]	C [nF]	$C_{1m}/C_{0.5m}$ [-]
intaktes Hüllrohr	1	2.29	1.95
	0.5	1.17	
Loch \varnothing 2 mm	1	2.28	1.96
	0.5	1.16	
Loch \varnothing 5 mm	1	2.27	1.97
	0.5	1.15	
Loch \varnothing 10 mm	1	2.25	1.99
	0.5	1.13	

Tab. 5.4: Kapazität der Hüllrohre mit der Länge 1 und 0.5 Meter, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz an Probekörpern in Lösung

5.5.3 Gleiche Anzahl Löcher pro Hüllrohrlänge

Für die Überprüfung des Parallelmodells bei einer gleichen Anzahl Löcher pro Länge des Hüllrohrs wurden Widerstandsmessungen an einem 0.5 Meter langen Hüllrohr mit einem Loch verschiedener Grösse und an einem 1 Meter langen Hüllrohr mit zwei Löchern verschiedener Grösse durchgeführt.

Weil das 0.5 Meter lange Hüllrohr nur halb so viele Löcher wie das 1 Meter lange aufweist, hat das 0.5 Meter lange Hüllrohr gemäss dem Parallelmodell einen doppelt so hohen Widerstand (die Änderung des kapazitiven Hüllrohrwiderstands hat keinen Einfluss auf R_{Ω}). Dieses Verhalten konnte mit den Messungen an Probekörpern in Lösung (Tabelle 5.5) beobachtet werden.

Bei der Betrachtung des Verlustfaktors wird auch der kapazitive Hüllrohrwiderstand massgebend. Dieser nimmt gemäss Abschnitt 5.5.2 proportional mit der Hüllrohrlänge zu. Bei der doppelten Anzahl Löcher halbiert sich nach Abschnitt 5.5.1 der ohmsche Lochwiderstand. Da der Verlustfaktor als negativer kapazitiver Widerstand dividiert durch den ohmschen Widerstand definiert ist, sollte sich der Verlustfaktor bei gleicher Anzahl Löcher pro Hüllrohrlänge nicht ändern. Dieser Sachverhalt konnte mit den Messungen an Probekörpern in Lösung (Tabelle 5.5) sehr gut bestätigt werden.

Fehlstelle	Hüllrohrlänge [m]	R_{Ω} [k Ω]	$R_{\Omega 0.5m}/R_{\Omega 1m}$ [-]	D [-]	$D_{0.5m}/D_{1m}$ [-]
1 Loch \varnothing 2 mm	0.5	152.6	2.12	0.888	0.90
2 Löcher \varnothing 2 mm	1	71.7		0.986	
1 Loch \varnothing 5 mm	0.5	35.1	1.93	3.93	1.00
2 Löcher \varnothing 5 mm	1	18.1		3.93	
1 Loch \varnothing 10 mm	0.5	14.83	2.10	9.52	0.92
2 Löcher \varnothing 10 mm	1	7.07		10.4	

Tab. 5.5: Ohmscher Widerstand und Verlustfaktor an einem Hüllrohr mit der Länge 0.5 Meter mit einem Loch und an einem Hüllrohr mit der Länge 1 Meter mit zwei Löchern, gemessen mit dem LCR-Meter mit einer Frequenz von 1 kHz an Probekörpern in Lösung

5.6 VERGLEICH DER PROBEKÖRPER IN BETON UND IN LÖSUNG

Die Leitfähigkeit der verwendeten Lösung wurde aufgrund der Messungen an den Betonkörpern nach 131 Tagen festgesetzt. Die Bestimmung des spezifischen Betonwiderstands durch Messung des Widerstands zwischen den beiden Bewehrungsnetzen zu dem genannten Zeitpunkt ergab einen durchschnittlichen Wert von 100.3 Ω m. Dadurch wurde die Lösung mit einem spezifischen Widerstand von 100 Ω m hergestellt und für die Messungen benutzt. Der Verlustfaktor wurde bei den Betonkörpern zum ersten Mal erst nach 146 Tagen gemessen. Aus diesem Grund wird der Vergleich zwischen den Messwerten der Betonkörper und denjenigen der Probekörper in Lösung mit der Messung nach 146 Tagen vorgenommen. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Durchschnitt des spezifischen Betonwiderstands 107 Ω m.

Wie in Tabelle 5.6 ersichtlich ist, bestehen Unterschiede zwischen den Messwerten der Probekörper aus Beton und denjenigen in Lösung. Diese Abweichungen lassen sich wie folgt erklären: Der spezifische Widerstand des Betons und der Lösung ist ungefähr gleich. Die Löcher der Probekörper in Lösung sind jedoch mit Lösung gefüllt. Die Löcher der Betonprobekörper sind jedoch gemäss Abschnitt 5.5 mit Injektionsgut gefüllt. Da dieses einen kleineren

spezifischen Widerstand als der Beton und dadurch auch einen kleineren als die Lösung besitzt, sind die Widerstände der Betonprobekörper tiefer als diejenigen der Probekörper in Lösung.

Fehlstelle	$R_{\Omega\text{Beton}}$ [k Ω]	$R_{\Omega\text{Lösung}}$ [k Ω]	D_{Beton} [-]	$D_{\text{Lösung}}$ [-]
intaktes Hüllrohr	3700	7000	0.018	0.010
Loch \varnothing 2 mm	98.7	142.9	0.669	0.484
Loch \varnothing 10 mm	4.71	12.5	14.0	5.68

Tab. 5.6: Ohmscher Widerstand und Verlustfaktor der Betonprobekörper nach 146 Tagen und der Probekörper in Lösung, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz

Die gemessenen Kapazitäten bei den Betonkörpern und bei den Probekörpern in Lösung stimmen mit kleinen Abweichungen sehr gut überein (Abbildung 5.7).

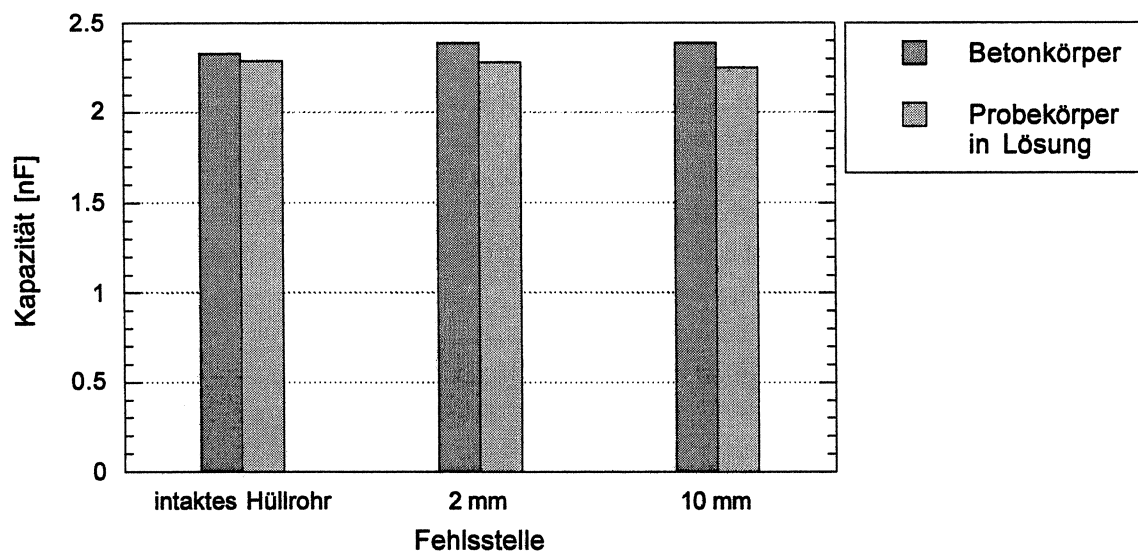


Abb. 5.7: Kapazität der Probekörper in Lösung und der Betonkörper nach 146 Tagen, gemessen mit dem LCR-Meter bei einer Frequenz von 1 kHz

5.7 MODELL FÜR DEN ELEKTRISCHEN WIDERSTAND VON KUNSTSTOFFHÜLLROHREN

5.7.1 Annahmen

Für die Modellierung des elektrischen Widerstands von Kunststoffhüllrohren werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Widerstand einer Fehlstelle im Hüllrohr bei den Messfrequenzen von 1 kHz und 120 Hz entspricht einem rein ohmschen Widerstand (siehe Abschnitt 2.3.3)
- Für den Betonwiderstand wird nicht der an den Betonprobekörpern gemessene eingesetzt, sondern nur ein Bruchteil davon. Der Grund dafür ist, dass die Löcher im Hüllrohr der Probekörper nicht mit Beton gefüllt sind, sondern mit Injektionsgut (siehe Abschnitt 5.5 und 5.6)

5.7.2 Modell

In Tabelle 5.7 sind die Ergebnisse der Messungen des Real- und Imaginärteils der Impedanz am Probekörper RF, der ein intaktes Hüllrohr enthält, zu drei verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Bei einem rein kapazitiven Widerstand wäre $RE(Z)$ gleich Null. Aus der unten dargestellten Messung am Probekörper RF mit dem intakten Hüllrohr resultiert jedoch ein durchschnittlicher Realteil der Impedanz von 1.2 k Ω . Aus diesem Grund wird der Widerstand des Hüllrohrs durch einen kapazitiven Widerstand R_C und einem dazu in Serie geschalteten ohmschen Widerstand R_H modelliert.

Zeit [d]	RE(Z) [k Ω]	IM(Z) [k Ω]
125	1.08	-62.3
146	1.29	-62.9
160	1.34	-62.5

Tab. 5.7: Real- und Imaginärteil der Impedanz des Probekörpers RF, gemessen mit der Impedanzmessanlage mit einer Frequenz von 1 kHz

Bei einer Serieschaltung eines ohmschen mit einem kapazitiven Widerstand entspricht gemäss Abschnitt 2.2.1 der ohmsche Widerstand dem Realteil der Impedanz und der kapazitive dem Imaginärteil. Dadurch wird dem ohmschen Widerstand R_H der gemessene durchschnittliche Realteil mit einem Wert von 1.2 k Ω zugewiesen. Der kapazitive Widerstand R_C wird aus der am Probekörper gemessenen Kapazität mit den Gleichungen 2.13 und 2.12 berechnet:

$$R_C = -iZ_C \quad (5.6)$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.7)$$

R_C	= kapazitiver Widerstand des Hüllrohrs	[Ω]
i	= imaginäre Einheit	[-]
C	= Kapazität	[F]
f	= Frequenz	[Hz]

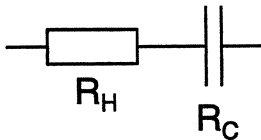


Abb. 5.8: Widerstandsmodell des intakten Hüllrohrs

Zusammenfassend wird nochmals das Widerstandsmodell für das intakte Hüllrohr dargestellt (Abbildung 5.8): Der Widerstand des Hüllrohrs besteht aus einer Serieschaltung des kapazitiven Widerstands R_C mit dem ohmschen Widerstand R_H . Der Wert von R_H beträgt für ein 1 Meter langes Hüllrohr 1.2 k Ω und R_C wird aus der am jeweiligen Probekörper gemessenen Kapazität und den obenstehenden Gleichungen 5.6 und 5.7 bestimmt.

Im Abschnitt 5.5 wurde dargestellt, dass sich der Widerstand eines Hüllrohrs mit Fehlstellen aus einer Parallelschaltung der ohmschen Widerstände der Fehlstellen mit den Widerständen der Hüllrohrelemente zusammensetzt. Dadurch kann das in Abbildung 5.8 dargestellte Widerstandsmodell des intakten Hüllrohrs mit dem parallelgeschalteten Widerstand der Fehlstellen R_F ergänzt werden (Abbildung 5.9).

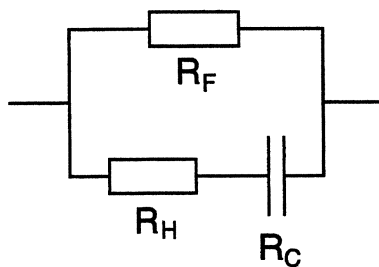


Abb. 5.9: Widerstandsmodell von Kunststoffhüllrohren mit Fehlstellen

Der Widerstand einer Fehlstelle R_F wird mit der im Abschnitt 2.4.2 dargestellten Gleichung berechnet:

$$R_F = R_L + R_A = \frac{4\rho_B t_d}{\pi d_h^2} + \frac{\rho_B}{\pi d_h} \arctan\left(\frac{2z}{d_h}\right) \quad (5.8)$$

R_F	= Widerstand einer kreisförmigen Verletzung	[Ω]
R_L	= Widerstand des zylindrischen Lochs	[Ω]
R_A	= Ausbreitungswiderstand	[Ω]

ρ_B	= spezifischer elektrischer Widerstand des Betons	[Ωcm]
t_d	= Wandstärke des Hüllrohrs	[cm]
d_h	= Durchmesser der Fehlstelle	[cm]
z	= Abstand Fehlstelle-Bewehrung	[cm]

Die Wandstärke t_d des verwendeten Hüllrohrs beträgt 0.25 cm und der Abstand z des Bewehrungsnetzes zur Fehlstelle hat bei den Probekörpern den Wert von 8.8 cm.

Der in Gleichung 2.33 vorkommende spezifische Widerstand des Betons ρ_B wird mittels der Gleichung 3.1 bestimmt. Zur Berücksichtigung des tieferen Widerstands des Injektionsguts, das in den Löchern enthalten ist, wird ρ_B mit einem Faktor B multipliziert:

$$\rho_B = B \frac{R_{\Omega\text{Netz-Netz}} A}{l} \quad (5.9)$$

ρ_B	= Spezifischer Betonwiderstand	[Ωm]
B	= Faktor zur Berücksichtigung des Injektionsguts	[-]
$R_{\text{WNetz-Netz}}$	= Ohmscher Widerstand zwischen den Bewehrungsnetzen	[Ω]
A	= Fläche des Bewehrungsnetzes	[m^2]
l	= Abstand der Bewehrungsnetze	[m]

Für den Faktor B wurde bei den Berechnungen der Wert von 0.6 eingesetzt. Die Fläche A des Bewehrungsnetzes beträgt 0.3 m^2 und der Abstand l der Netze 0.24 m.

Der Real- und Imaginärteil der Impedanz des oben dargestellten Widerstandsmodells wird durch den folgenden Berechnungsgang abgeleitet:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_H + R_C} \quad (5.10)$$

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_H + R_C}} \quad (5.11)$$

$$Z = \frac{R_F (R_H - iZ_C)}{R_H + R_F - iZ_C} \quad (5.12)$$

$$Z = \frac{R_F (R_H^2 + R_H R_F + Z_C^2) - i R_F^2 Z_C}{(R_H + R_F)^2 + Z_C^2} \quad (5.13)$$

$$\text{RE}(Z) = \frac{R_F (R_H^2 + R_H R_F + Z_C^2)}{(R_H + R_F)^2 + Z_C^2} \quad (5.14)$$

$$\text{IM}(Z) = \frac{-R_F^2 Z_C}{(R_H + R_F)^2 + Z_C^2} \quad (5.15)$$

$$|Z| = \sqrt{\text{RE}(Z)^2 + \text{IM}(Z)^2} \quad (5.16)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{IM}(Z)}{\text{RE}(Z)}\right) \quad (5.17)$$

Z	=	Impedanz des Hüllrohrs mit Fehlstellen	[Ω]
R _F	=	Ohmscher Widerstand der Fehlstellen	[Ω]
R _H	=	Ohmscher Widerstand des Hüllrohrs	[Ω]
R _C	=	Kapazitiver Widerstand des Hüllrohrs	[Ω]
i	=	imaginäre Einheit	[-]
RE(Z)	=	Realteil der Impedanz des Hüllrohrs mit Fehlstellen	[Ω]
IM(Z)	=	Imaginärteil der Impedanz des Hüllrohrs mit Fehlstellen	[Ω]
Z	=	Betrag der Impedanz des Hüllrohrs mit Fehlstellen	[Ω]
j	=	Phasenverschiebung des Hüllrohrs mit Fehlstellen	[Ω]

Die Umrechnung in die Messgrößen des LCR-Meters erfolgt durch Einsetzen der Gleichung 2.14 in die Gleichung 3.9:

$$R_\Omega = |Z| \sqrt{1 + \frac{\text{IM}(Z)^2}{\text{RE}(Z)^2}} \quad (5.18)$$

$$D = \frac{\text{RE}(Z)}{\text{IM}(Z)} \quad (5.19)$$

R _Ω	=	Ohmscher Widerstand, der mit dem LCR-Meter im Parallelmodus angezeigt wird	[Ω]
D	=	Verlustfaktor, der mit dem LCR-Meter im Parallelmodus angezeigt wird	[Ω]

5.7.3 Vergleich der gemessenen und mit dem Widerstandsmodell gerechneten Werte

Das Widerstandsmodell wird zuerst mit einer Messung an den Betonkörpern überprüft, anschliessend mit den Werten eines Probekörpers in Lösung. Die Messwerte wurden mit einer Frequenz von 1 kHz gemessen und gerechnet.

Messwerte der Betonkörper nach 146 Tagen

In Tabelle 5.8 ist die Berechnung der Werte mit dem Widerstandsmodell und der Vergleich mit den an den Betonkörpern nach 146 Tagen gemessenen Werten dargestellt. Der Berechnungsgang wird nochmals erklärt: Mit den an den Probekörpern gemessenen Kapazitäten C wird anhand der Gleichung 5.7 der Wert Z_C des kapazitiven Hüllrohrwiderstands ausgerechnet. Mit dem ohmschen Widerstand zwischen den Bewehrungsnetzen $R_{W_{\text{Netz-Netz}}}$ und dem Faktor B wird mittels der Gleichung 5.9 der spezifische Betonwiderstand r_B bestimmt. Mit diesem Wert und dem Lochdurchmesser d_h kann anhand der Gleichung 2.33 der Widerstand der Fehlstelle R_F berechnet werden. Beim Probekörper EI wurde für d_h ein äquivalenter Lochdurchmesser von 0.5 mm eingesetzt. Bei den anderen Probekörpern ohne Löcher wird für R_F ein sehr hoher Wert von 10^9 W eingesetzt, stellvertretend für den Wert eines Isolators. Durch Anwendung der Gleichungen 5.14 bis 5.19 lassen sich dann die zu vergleichenden Werte herleiten.

Bei Vergleich des berechneten Betrags der Impedanz $|Z|$ mit dem mit der Impedanzmessanlage gemessenen Wert $|Z|_{\text{Messung}}$ kann die Übereinstimmung der Werte mit einer maximalen Abweichung von 18 % als gut bewertet werden. Bei den Messgrössen j , R_Ω und D sind bei einzelnen Werten grosse Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten vorhanden. Die geringste Übereinstimmung von Modell und Wirklichkeit ist bei den Probekörpern 2B, EA und KSS festzustellen. Das hat folgende Gründe:

- 2B: Der Widerstand des zylindrischen Lochs (Gleichung 2.33) ist umgekehrt proportional zum Lochdurchmesser im Quadrat. Somit hat eine leicht unterschiedliche Lochgeometrie schon eine relativ grosse Abweichung vom berechneten Wert zur Folge. Zudem kann der spezifische Widerstand des zylindrischen Körpers aus Injektionsgut im Loch des Hüllrohrs über einen grösseren Bereich variieren, je nachdem, ob nur Zementbojake oder auch Zuschlagskörner während dem Verfüllen des Hüllrohrs in das Loch eingedrungen sind.
- Für EA ist das angewendete Modell wegen der Leitfähigkeit der Zementsteinschicht auf dem herausragenden Entlüftungsröhrchen (siehe Abschnitt 5.1) nicht geeignet.
- Beim Probekörper KSS verändert der angebrachte Schrumpfschlauch die Kapazität des Hüllrohrs. Dadurch müsste auch für den ohmschen Widerstand des Hüllrohrs R_H ein von

den anderen Probekörpern abweichender Wert eingesetzt werden.

Probekörper	C [nF]	Z _C [kΩ]	d _h [m]	R _Ω Netz-Netz [Ω]	ρ _B [Ωm]	R _F [kΩ]	RE(Z) [kΩ]	IM(Z) [kΩ]
2B	2.4	66.3	0.002	90.1	67.6	70.5	33.1	-34.6
10B	2.4	66.3	0.01	81.5	61.1	4.9	4.9	-0.4
40B	2.4	66.3	0.04	91.3	68.5	0.9	0.9	0.0
EA	2.6	61.2		87.6	65.7	1.0E+09	1.2	-61.2
EI	2.8	56.8	0.0005	75.1	56.3	773.4	5.3	-56.4
KP	2.4	66.3		81.6	61.2	1.0E+09	1.2	-66.3
KSS	1.9	83.8		89.7	67.3	1.0E+09	1.2	-83.8
SS	2.4	66.3		83.7	62.8	1.0E+09	1.2	-66.3
RF	2.4	66.3		90.5	67.9	1.0E+09	1.2	-66.3

Probekörper	Z [kΩ]	Z _{Messung} [kΩ]	Abweichung Z von Z _{Messung} [%]	φ [°]	φ _{Messung} [°]	Abweichung φ von φ _{Messung} [%]
2B	47.9	51.8	-7.5	-46.2	-57.9	20.2
10B	4.9	4.7	4.3	-4.2	-4.6	7.6
40B	0.9	0.8	7.4	-0.8	-1.0	(26.3)
EA	61.2	51.9	18.0	-88.9	-86.7	-2.5
EI	56.6	48.3	17.2	-84.6	-84.9	0.4
KP	66.3	57.9	14.6	-89.0	-88.7	-0.3
KSS	83.8	75.1	11.6	-89.2	-86.1	-3.6
SS	66.3	62.7	5.8	-89.0	-86.7	-2.6
RF	66.3	62.9	5.4	-89.0	-88.8	-0.2

Probekörper	R_{Ω} [k Ω]	$R_{\Omega\text{Messung}}$ [k Ω]	Abweichung R_{Ω} von $R_{\Omega\text{Messung}}$ [%]	D [-]	D_{Messung} [-]	Abweichung D von D_{Messung} [-]
2B	69.2	98.7	-29.9	-0.958	-0.669	-43.3
10B	4.9	4.7	3.7	-13.6	-14.0	3.0
40B	0.9	0.8	6.9	-76.2		
EA	3123	1150	172	-0.020	-0.052	62.3
EI	601	573	4.9	-0.095	-0.098	3.4
KP	3666	3000	22.2	-0.018	-0.022	17.7
KSS	5848	2380	146	-0.014	-0.034	57.9
SS	3666	3800	-3.5	-0.018	-0.017	-6.4
RF	3666	3700	-0.9	-0.018	-0.018	-0.5

Tab. 5.8: Berechnung der Werte mit dem Widerstandsmodell und Vergleich mit den an den Betonkörpern nach 146 Tagen gemessenen Werten

Probekörper in Lösung

Bei der Berechnung der Werte mit dem Widerstandsmodell für die 1 Meter langen Probekörper in Lösung wird der Faktor B zu 1 gesetzt, denn bei diesen Probekörpern ist sowohl in den Löchern als auch zwischen den Bewehrungsnetzen dieselbe Lösung vorhanden. An den Resultaten den Vergleichs der gerechneten mit den gemessenen Werten (Tabelle 5.9) ist ersichtlich, dass im Durchschnitt die Übereinstimmung der Werte leicht schlechter ist als bei den Betonprobekörpern.

Fehl- stelle	C [nF]	Z_C [k Ω]	d_h [m]	$R_{\Omega\text{Netz-Netz}}$ [Ω]	ρ_B [Ωm]	R_F [k Ω]	$RE(Z)$ [k Ω]	$IM(Z)$ [k Ω]
intakt	2.3	69.2		88.4	110.5	1.0E+09	0.8	-69.2
2 mm	2.3	69.2	0.002	88.4	110.5	115.4	30.8	-50.4
5 mm	2.3	69.2	0.005	88.4	110.5	24.9	22.0	-7.9
10 mm	2.3	69.2	0.01	88.4	110.5	8.8	8.7	-1.1

Fehl- stelle	$ Z $ [k Ω]	$ Z _{\text{Messung}}$ [k Ω]	Abweichung $ Z $ von $ Z _{\text{Messung}}$ [%]	φ [$^\circ$]	φ_{Messung} [$^\circ$]	Abweichung φ von φ_{Messung} [%]
intakt	69.2	60.8	13.8	-89.3	-88.1	-1.4
2 mm	59.0	56.5	4.5	-58.6	-65.8	11.0
5 mm	23.4	28.6	-18.3	-19.7	-29.6	33.4
10 mm	8.8	12.2	-28.2	-7.3	-11.2	35.1

Fehl- stelle	R_Ω [k Ω]	$R_{\Omega\text{Messung}}$ [k Ω]	Abweichung R_Ω von $R_{\Omega\text{Messung}}$ [%]	D [-]	D_{Messung} [-]	Abweichung D von D_{Messung} [-]
intakt	5986	7800	-23.3	-0.012		
2 mm	113.2	142.9	-20.8	-0.611	-0.484	-26.3
5 mm	24.8	32.6	-23.9	-2.789	-2.140	-30.3
10 mm	8.8	12.5	-29.4	-7.838	-5.680	-38.0

Tab. 5.9: Berechnung der Werte mit dem Widerstandsmodell und Vergleich mit den an den Probekörpern in Lösung gemessenen Werten

5.7.4 Berechneter Widerstand für ein 100 m langes Spannglied

Die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden an 1 Meter und 0.5 Meter langen Hüllrohren durchgeführt. Für die Anwendung der elektrischen Widerstandsmessung an Bauwerken sind jedoch die Widerstandswerte für längere Hüllrohre von Interesse. Aufgrund der Ergebnisse der Versuche an verschiedenen langen Hüllrohren und verschiedener Anzahl Fehlstellen (Abschnitt 5.5) lässt sich der Widerstand eines beliebig langen Hüllrohrs modellieren.

Als Beispiel wird der Widerstand eines 100 Meter langen Hüllrohrs mit einem Loch gleichen Durchmessers pro Meter Länge mit dem oben aufgestellten Widerstandsmodell berechnet. Für die Berechnung des Widerstands des intakten Hüllrohrs wird das Hüllrohr in 100 Elemente mit einer Länge von einem Meter unterteilt. Dadurch ergibt sich das in Abbildung 5.10 dargestellte Widerstandsmodell.

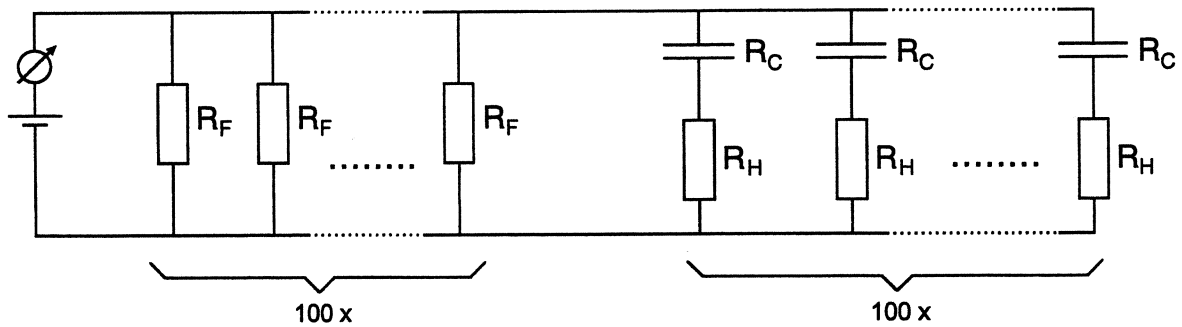


Abb. 5.10: Widerstandsmodell eines 100 Meter langen Hüllrohrs mit einem Loch pro Meter Länge

Die Messgrößen des 100 Meter langen Hüllrohrs können aus den Werten des 1 Meter langen wie folgt berechnet werden (die Messgrößen des 100 Meter langen Hüllrohrs sind mit dem Index 100m bezeichnet, diejenigen des 1 Meter langen mit 1m):

$$\frac{1}{Z_{100m}} = \sum_{i=1}^{100} \frac{1}{R_{F1m}} + \sum_{i=1}^{100} \frac{1}{R_{H1m} + R_{C1m}} \quad (5.20)$$

$$\frac{1}{Z_{100m}} = \frac{100}{R_{F1m}} + \frac{100}{R_{H1m} + R_{C1m}} \quad (5.21)$$

$$\frac{1}{Z_{100m}} = \frac{100}{Z_{1m}} \quad (5.22)$$

$$Z_{100m} = \frac{Z_{1m}}{100} \quad (5.23)$$

$$|Z|_{100m} = \frac{|Z|_{1m}}{100} \quad (5.24)$$

$$\varphi_{100m} = \varphi_{1m} \quad (5.25)$$

$$R_{\Omega 100m} = \frac{R_{\Omega 1m}}{100} \quad (5.26)$$

$$D_{100m} = D_{1m} \quad (5.27)$$

Gemäss den Messwerten der Betonprobekörper wurde eine Kapazität C von 2.4 nF und einen mittleren Widerstand zwischen den Bewehrungsnetzen von 85 Ω für die Berechnung der-

Werte mit dem Widerstandsmodell verwendet. Für den Faktor B wurde wiederum ein Wert von 0.6 eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Loch-durchmesser	$ Z $ [k Ω]	φ [°]	R_{Ω} [k Ω]	D [-]
0.5 mm	0.660	-84.6	7.066	-0.094
1 mm	0.635	-73.3	2.206	-0.301
2 mm	0.466	-44.6	0.654	-1.015
5 mm	0.140	-12.2	0.143	-4.632
10 mm	0.051	-4.4	0.051	-13.021

Tab. 5.10: Werte eines 100m Meter langen Hüllrohrs mit einem Loch gleicher Grösse pro Meter Länge, berechnet mit dem Widerstandsmodell für die Frequenz 1 kHz

5.7.5 Ueberprüfung an Pilotobjekten

Die Spannglieder im Pilotobjekt P.S. du Milieu weisen exakt eine Länge von 100 m auf, der Hüllrohrtyp ist derselbe wie der in den Laboruntersuchungen verwendete (59 mm), das heisst sie können für einen direkten Vergleich mit den Labormessungen und den Berechnungsmodellen verwendet werden. Die Brücke weist 5 Hochpunkte sowie zwei Verankerungen auf, d.h. es wurden plangemäss 7 Entlüftungsröhrchen eingebaut.

Aus den Labormessungen wird für den ohmschen Widerstand des 1 m langen Hüllrohrs ein Wert von ca. 4000 k Ω eingesetzt (Abb. 4.4), für das 100 m lange Hüllrohr erhält man einen ohmschen Widerstand von 40 k Ω . Dieser (theoretische) ohmsche Widerstand des vollständig intakten Hüllrohrs ist nun parallelgeschaltet zu den 7 vorhandenen (systembedingten) Entlüftungsröhrchen und man erhält für PS du Milieu einen Wert von $R_{\text{theor}} 28 \text{ k}\Omega$.

Nr.	R exp kOhm	R theor kOhm	R Loch kOhm	C 1kHz nF	D 1kHz -	
1	7.23	28	9.7	234.0	0.093	
2	13.7	28	26.6	233.0	0.048	
3	20.87	28	80	235.0	0.032	
4	17.81	28	48.4	237.2	0.037	
5	28.25	28	infinite	234.7	0.023	7 Entlüftungsrohre
6	6 Ω	-	-	-	28.5	

Tab. 5.11: Experimentell gemessener und Lochwiderstand der Spannglieder in der Brücke PS du Milieuca. 8 Jahre nach Injektion. Messgerät LCR 1 kHz

Die Parallelschaltung von R_{theor} mit dem ohmschen Widerstand eventueller Verletzungen oder Löcher, R_{Loch} , ergibt zusammen den gemessenen ohmschen Widerstand R_{exp} (Tab. 5.11).

Für das Spannglied Nr. 5 wird der Widerstand R_{Loch} unendlich hoch, d.h. dieses Spannglied ist vollständig intakt und in perfektem Zustand, was auch durch den sehr tiefen Verlustfaktor $D = 0.023$ bestätigt wird. Im weiteren sind diese $28 \text{ k}\Omega$ somit der maximal mögliche Wert des ohmschen Widerstands eines 100 m langen Spannglieds mit den erforderlichen Entlüftungsröhrchen.

Die mit dem LCR Meter erhaltenen experimentellen Messwerte R_{exp} bei 1 kHz der anderen Spannglieder liegen im Bereich von 7 bis $21 \text{ k}\Omega$, daraus errechnen sich äquivalente ohmsche Widerstände für R_{Loch} von 9.7 bis $80 \text{ k}\Omega$ (Tabelle 5.11). Die Verlustfaktoren werden parallel zu den sinkenden ohmschen Widerständen grösser (Abb. 5.11). Ebenfalls ersichtlich wird die Parallelschaltung zwischen Lochwiderstand und theoretischem Widerstand. Der verbleibende Verlustfaktor 0.022 entspricht dem ohmschen Widerstand des intakten Hüllrohrs mit Entlüftungsröhrchen.

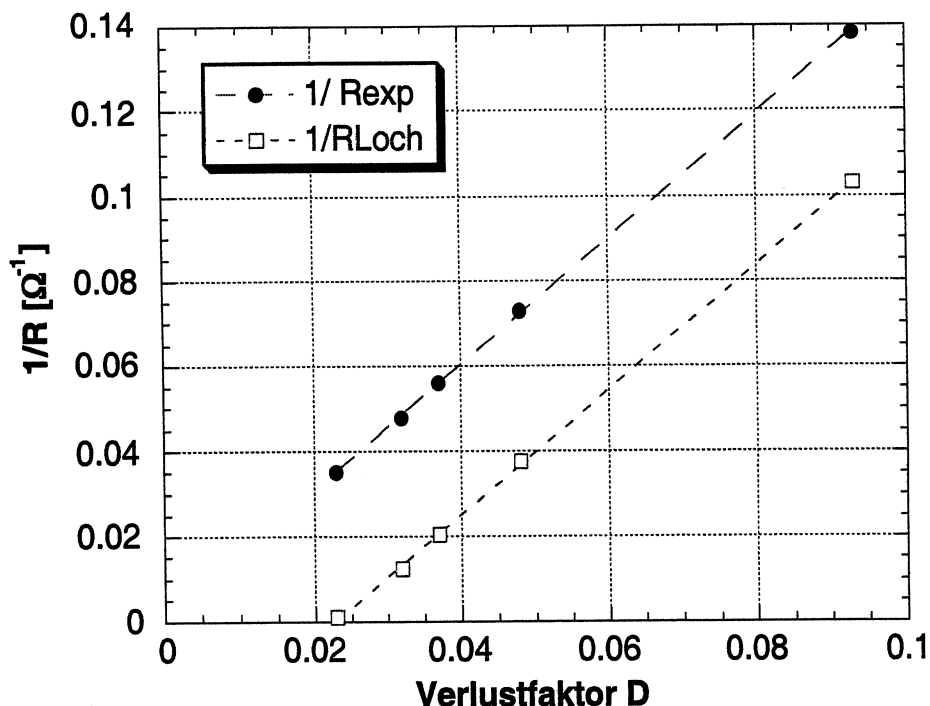


Abb. 5.11: Kehrwert des ohmschen Widerstands R_{exp} und R_{Loch} versus Verlustfaktor D der Spannglieder an P.S. du Milieu.

Der verbleibende Lochwiderstand von $80 \text{ k}\Omega$ entspricht in etwa 2 „Löchern“ bzw. äquivalenten Verletzungen mit 2 mm Durchmesser, ein Wert von $10 \text{ k}\Omega$ etwa 12 derartigen Verletzungen auf 100 m Kabellänge. Damit können alle Spannglieder des P.S. du Milieu als weitgehend bis vollständig intakt und nicht korrosionsgefährdet betrachtet werden.

5.8 ZUSAMMENFASSUNG DER DISKUSSION

In der Diskussion wurde zunächst untersucht, wie sich die Betonfeuchtigkeit und die Temperatur den elektrischen Widerstandswerten überlagern. Der Temperatureinfluss kann mit dem aus der Literatur bekannten Arrheniusgleichung kompensiert werden, so dass die Messwerte auf 20 °C normalisiert werden können. Für übliche Umgebungstemperaturen ist der Einfluss jedoch gering.

Zum Einfluss der Fehlstellenart und -grösse kann festgehalten werden, dass sich fachgerecht ausgeführte mechanische Kupplungen oder Spiegelschweissungen nicht als Fehlstellen bemerkbar machen. Ueber die Kapazitätswerte kann die Geometrie des Hüllrohrs (Durchmesser, Wandstärke) überprüft werden.

Der Einfluss unterschiedlicher Messgeräte wurde ebenfalls diskutiert, hier zeigte sich eine sehr gute Uebereinstimmung der Daten zwischen der Impedanzmessanlage und den bei zwei fixen Frequenzen messenden LCR Metern - die Verwendung von reinen Erdungsmessgeräten muss hingegen aus Gründen der kapazitiven Impedanz des Hüllrohrs verneint werden. Die Daten der Pilotobjekte erlauben, eine grobe Korrelation zwischen elektrischem Widerstand ($Ge\Omega$) und ohmschem Widerstand (LCR Meter) zu erhalten.

In Uebereinstimmung mit der Zielsetzung der Arbeit wird ein Modell für den elektrischen Widerstand von Kunststoffhüllrohren erarbeitet und diskutiert. Das Modell beruht auf der Grundidee einer Parallelschaltung vieler RC Elemente (charakterisieren das intakte Hüllrohr) mit den systembedingt vorhandenen Fehlstellen (Kupplungen, Entlüftungsröhrchen) und echten Verletzungen. Ein Vergleich der experimentell erhaltenen mit den berechneten Werten der Impedanz Z , der Kapazität C und des ohmschen Widerstands R zeigt eine gute Uebereinstimmung. Kritischer Punkt ist der elektrische Widerstand des Betons in einer kleinen Fehlstelle: da an dieser Stelle praktisch nur Zementstein vorliegt, ist auch der elektrische Widerstand geringer als derjenige des umliegenden Betons. Die mit dem Modell berechneten Werte für ein 100 m langes Spannglied werden mit den Werten der Pilotobjekte verglichen, auch hier zeigt sich eine gute Uebereinstimmung.

6 GRENZWERTE FÜR DIE RICHTLINIE ASTRA / SBB

Das Bundesamt für Strassen sowie die SBB haben eine Richtlinie erarbeitet, welche die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die Ueberwachbarkeit von Spanngliedern in Kunstbauten regelt [4]. Darin werden auch die Grenzwerte für die verlangte elektrische Isolation festgesetzt. Auf der Basis der Resultate dieser Forschungsarbeit können folgende Punkte festgehalten werden

- die Messungen müssen mit Geräten durchgeführt werden, welche eine klare Differenzierung zwischen ohmscher und kapazitiver Impedanz ermöglichen und die Bestimmung des Verlustfaktors erlauben (z.B. LCR Meter).
- Die Grenzwerte für den minimal zu erreichenden ohmschen Widerstand hängen vom Durchmesser des Hüllrohrs ab und sind als spezifische Werte ($k\Omega \cdot m$) zu definieren
- der Verlustfaktor ist als zusätzliche Informationsquelle für die Interpretation beizuziehen.

Unter Punkt 6.3 der Richtlinie wird festgehalten:

„Die elektrische Isolation zwischen Ankerkopf und Tragwerk wird an jedem Spannglied der Kategorie c mit der elektrischen Widerstandsmessung überprüft. Die Planung, Durchführung und Beurteilung der Messungen sind in Anhang 2 der Richtlinie beschrieben. Die Anforderung an einen umfassenden Korrosionsschutz, d.h. elektrische Isolation des Spannstahles von der nicht vorgespannten Bewehrung und Dichtigkeit derer Schutzhülle, sind erfüllt, wenn das fertig gespannte und injizierte Spannglied den Grenzwert für den spezifischen Widerstand gemäss Tabelle A2/2 im Anhang 2 einhält.“

6.1 GRENZWERT DES WIDERSTANDS

Der Grenzwert von $500 k\Omega \cdot m$ für Hüllrohre mit Durchmesser 59 mm bedeutet, dass für das Beispiel von P.S. du Milieu mit 100 m langen Spanngliedern ein experimentell gemessener ohmscher Widerstand von $5 k\Omega$ zur Erreichung des Grenzwerts erforderlich wäre. Alle Spannglieder ausser Nr. 6 (Kurzschluss) erfüllen dieses Kriterium, dies wird auch durch die tiefen Verlustfaktoren bestätigt (Tab. 4.7) Der ohmsche Widerstand von $5 k\Omega$ entspricht gemäss Abb. 5.6 einem mit dem Geohm gemessenen Wert von ca. 2 - 3 $k\Omega$, was von allen Spanngliedern von P.S. du Milieu auch zu Beginn übertroffen wurde (Tab. 4.6).

Für die Brücke Pré du Mariage (Tab. 4.11) ergibt sich mit dem Kriterium $400 k\Omega \cdot m$ (für die dort verwendeten Hüllrohre mit Durchmesser 76 mm), dass die Spannglieder 3, 4, 5 und 6 in einwandfreiem Zustand vorliegen, die Spannglieder 1 und 2 jedoch leichte Defekte aufweisen. Dies wird auch durch die hohen Verlustfaktoren von 0.20 bzw. 0.279 bestätigt.

Bei der Brücke Burg-Aderahubel erfüllt keines der Spannglieder den Grenzwert (Tab. 4.9).

6.2 GRENZWERT DES VERLUSTFAKTORS

Aus den Resultaten der Labormessungen geht hervor, dass auch ein Spannglied mit vollständig intaktem Hüllrohr einen Verlustfaktor von 0.018 aufweist, sofern Entlüftungsröhrchen vorhanden sind ergibt sich 0.022 (Tab. 4. 2). Diese Werte wurden an Pilotobjekten bestätigt, auch das beste Spannglied in der Brücke P.S. du Milieu weist einen Verlustfaktor von 0.023 auf (Tab. 4. 7).

Realistische Werte des Verlustfaktors welche an der Brücke P.S. du Milieu gemessen wurden, liegen im Bereich 0.03 - 0.1 (Tab. 4.7), alle diese Spannglieder können als intakt und vor Korrosion geschützt betrachtet werden (s. Kap. 5.7.5). Werte des Verlustfaktors zwischen 0.1 und 0.2 (z.B. Pré du Mariage, Nr. 1, 3 und 6) zeigen kleine Defekte (zum Vergleich: Labormessungen mit einem 2 mm Loch $D = 0.654$).

Werte des Verlustfaktors deutlich über 0.2 weisen auf das Vorhandensein von Defekten hin, welche in ihre Grösse nicht mehr vernachlässigt werden können. Solche Spannglieder sind nicht sofort in höherem Masse korrosionsgefährdet, die Verletzungen oder Löcher stellen jedoch mögliche Eindringstellen von Wasser und Chloriden dar. Solche Spannglieder sind besonders auf einen ev. starken Abfall des ohmschen Widerstands mit der Zeit zu überprüfen.

6.3 KAPAZITÄTEN

Die gemessenen Kapazitätswerte erlauben eine Ueberprüfung des Hüllrohrdurchmessers bzw. der Wandstärke. Die Messwerte sind proportional zur Länge des Spannglieds (s. Gl. 2.32). Aus den im Labor gemessenen Werten an 1 m langen Hüllrohren (59 mm) mit Wandstärke 0.25 cm errechnet sich eine Dielektrizitätskonstante von $\epsilon_r = 3.7 \pm 0.1$ was sehr gut mit den Materialcharakteristiken (Polypropylen) übereinstimmt [12].

Die erwarteten Werte der Kapazität können damit für die verschiedenen Hüllrohrdurchmesser (PT Plus) berechnet werden (Tab. 6.1). Ein Vergleich mit den an den Pilotobjekten ge-

Hüllrohrtyp	d [cm]	t [cm]	C [nF/m]	C feld [nF/m]
59	5.9	0.25	2.33	2.33
76	7.6	0.25	3.04	2.11
100	10.0	0.3	3.35	3.72

Tab. 6.1: Berechnete Kapazitätswerte für Polypropylenhüllrohre ($\epsilon_r = 3.72$)

messenen Kapazitätswerten (Tab. 6.1) zeigt eine sehr gute Uebereinstimmung. Damit lassen sich die experimentell gemessenen Kapazitätswerte zur Ueberprüfung der Länge, des Typs und insbesondere der Wandstärke der eingesetzten Hüllrohre verwenden.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegende Forschungsarbeit hat theoretisch und experimentell nachgewiesen, dass die Messung der elektrischen Impedanz („elektrischer Widerstand“) zwischen Spannglied und normaler Bewehrung sehr gut geeignet ist, um die elektrische Isolation der Spannstähle und die Dichtigkeit der Hüllrohre zu überprüfen. Damit kann erstmals auch der Korrosionsschutz der Spannglieder überprüft werden. Um aussagekräftige Resultate zu erhalten ist es jedoch erforderlich, den ohmschen und den kapazitiven Widerstand separat zu erfassen.

Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- **Messgeräte:** die Verwendung von Messgeräten, welche nur einen elektrischen Widerstand (ohne Phaseninformation) angeben, ist nicht genügend. Dies heisst, dass Erdungsmessgeräte wie Unilap Geo, GeOhm, etc.) oder einfache Multimeter nicht verwendet werden können. Es sollen nur Geräte eingesetzt werden, die den ohmschen Widerstand und die Kapazität mit genügend grosser Genauigkeit erfassen (z.B. LCR-Meter).
- **Grenzwerte:** die Angabe eines fixen Grenzwerts basierend auf dem ohmschen Widerstand ist nicht möglich, da die Messwerte vom Durchmesser und der Länge des Spannglieds abhängig sind. Daher wird neu für jeden Hüllrohrdurchmesser ein spezifischer Grenzwert in $k\Omega \cdot m$ postuliert. Dieser Grenzwert wurde sowohl im Labor als auch auf Pilotobjekten verifiziert.
- **Fehlstellen und Hüllrohrkupplungen:** echte Fehlstellen (d.h. Verletzungen im Hüllrohr) werden sowohl vom ohmschen Widerstand als auch vom Verlustfaktor detektiert. Fachgerecht ausgeführte mechanische Hüllrohrkupplungen, Spiegelschweissungen etc. haben keine nachteilige Wirkung auf die Isolation und die Dichtigkeit der Hüllrohre. Entlüftungsröhrchen müssen sehr sorgfältig abgedichtet werden.
- **Pilotobjekte:** Erfahrungen mit den ausgeführten Pilotobjekten haben gezeigt, dass die Anforderungen an die elektrische Isolation bei sorgfältiger Ausführung problemlos erreicht werden können. Das Wissen um die mögliche Ueberprüfung der elektrischen Isolation führt zu einem höheren Qualitätsbewusstsein auf allen Ebenen.
- **Interpretation:** die Interpretation des ohmschen Widerstands als Mass für die Dichtigkeit des Hüllrohrs ist mit dieser Arbeit theoretisch und experimentell abgestützt. Auch ohne diesen Hintergrund kann das Auftreten und eine mit der Zeit zunehmende Korrosionsgefährdung eines Spannglieds durch den Abfall des gemessenen ohmschen Widerstands problemlos erfasst werden (zeitlicher Verlauf) und es können rechtzeitig Massnahmen ergriffen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Elsener, H. Böhni, R. Bräunlich, A. Markees, Zerstörungsfreie Spannkabelprüfung mit reflektometrischer Impulsmessung, Forschungsbericht Nr. 528, Vereinig. Schweiz. Strassenfachleute (VSS) Zürich (1997)
- [2] P. Matt, Spannsysteme - Zerstörungsfreie Prüfung bei bestehenden Brücken und überwachbare Systeme der Zukunft, SIA Dokumentation D099 Erhaltung von Brücken, Schweiz. Ingenieur und Architektenverein, Zürich (1993) S. 95
- [3] P. Matt, Dauerhaftigkeit von Spannsystemen bei bestehenden und neuen Brücken, SIA Dokumentation D0129 Erhaltung von Brücken, Schweiz. Ingenieur und Architektenverein Zürich (1996) S. 71
- [4] Bundesamt für Strassen und SBB AG: Richtlinie Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten (2001)
- [5] D. Bürchler: Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen, Dissertation Nr. 11876, 1996, ETH Zürich
- [6] R. B. Polder, M. B. G. Katelaars: Electrical resistance of blast furnace slag cement and ordinary portland cement concretes, Proc. Int. Conf. on Blended Cements in Construction, Elsevier Applied Science, 1991, London
- [7] B. Elsener, Ionenmigration und elektrische Leitfähigkeit im Beton, SIA Dokumentation D065 „Elektrochemische Schutzverfahren“, Schweiz. Ing. und Arch. verein Zürich (1990) S. 51 - 59
- [8] B. Elsener, H. Böhni: Significance of Ohmic Resistance Measurements in the Case of Localized Corrosion, EFC-Workshop on Electrochemical Corrosion Testing, 11. - 13.9.1985 in Ferrara/Italy, Dechema Monographie 101, p. 279 - 288
- [9] J. Newman: Resistance for Flow of Current to a Disc, Journal of the Electrochemical Society 113 (1966), p. 501
- [10] H. J. Pearson, G. T. Burstein, R. C. Newman: Resistance to Flow of Current to Scratched Electrodes, Journal of the Electrochemical Society 128 (1981), p. 2297
- [11] SIA Dokumentation D 031: Anker und Spannkabel, 1997, SIA, Zürich
- [12] F.A. Zahn: Electrically Isolated Tendons with PT-Plus Duct, VSL Test Report, 1995, VSL (Switzerland) Ltd., Lyssach