

Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahn- platten aus Beton mit Belagsaufbau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 55

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The 'b' is particularly prominent with its thick stroke.

Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahn- platten aus Beton mit Belagsaufbau

von

Hans-Joachim Krause
Institut für Schichten und Grenzflächen (ISG-2)
Forschungszentrum Jülich

Edmund Rath
Bundesanstalt für Straßenwesen
Bergisch Gladbach

Gottfried Sawade
Materialprüfungsanstalt (MPA) Otto-Graf-Institut
Universität Stuttgart

Frank Dumat
Baustoff- und Bodenprüfstelle Kassel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 55

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M- Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.386/2003/HRB:
Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung
von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belags-
aufbau**

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-86509-660-3

Bergisch Gladbach, Februar 2007

Kurzfassung – Abstract

Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Zur Zustandsbeurteilung von Brückenfahrbahnplatten ist es wichtig, die Feuchte und den Salzgehalt des bewehrten Betons zu kennen. Üblicherweise wird die Versalzung mittels Potentialmessung bestimmt und durch Laboranalyse von Proben verifiziert. Diese Methode erfordert aber das Entfernen des Fahrbahnbelags. Um eine zerstörungsfreie Bestimmung des Betonzustandes und des Salzgehaltes des Betons mit einem fahrzeugbasierten Messsystem von der Fahrbahn aus durchführen zu können, wurde eine Kombinationsmethode aus Georadar und Magnetfeldmessung entwickelt. Ermittelt man die komplexe Dielektrizitätskonstante (DK) des Baustoffs im Mikrowellen-Bereich, so ist es möglich, über entsprechende Kalibrationskurven seine Feuchte und seinen Salzgehalt abzuleiten. Mit einem 1 GHz-Bodenradar wird die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen von der Fahrbahnoberfläche bis zur oberflächennahen Bewehrung bestimmt. Die Tiefe dieser Bewehrungsstäbe wird unabhängig durch eine magnetische Gleichfeld-Methode ermittelt. Nach Aufmagnetisierung werden mehrere Gradientenkomponenten des statischen magnetischen Feldes der Bewehrungsbügel gemessen und daraus die Bügeltiefe berechnet. Diese magnetische Tiefenbestimmung ist unabhängig von den dielektrischen Eigenschaften der dazwischen befindlichen Materialien. Durch Vergleich der Radar-Laufzeit mit der magnetisch gemessenen Tiefe lässt sich der Realteil der effektiven DK des überdeckenden Betons bestimmen. Die Analyse der reflektierten Radar-Amplitude erlaubt eine Abschätzung des Salzgehaltes. Zusätzlich wurde ein dielektrischer Resonator für die Feuchte- und Salzgehaltmessung von Baustoffen entwickelt, der aus einer zylindrischen Mikrowellenkeramik hoher DK in einem halboffenen Metallgehäuse besteht. Aus der Messung der Resonanzfrequenz und der Güte beim Aufbringen des Resonators auf den Baustoff lässt sich sein Feuchte- und Salzgehalt ableiten. Die an Beton-Probekörpern bekannter Feuchte und Versalzung durchgeführten experimentellen Untersuchungen bestätigten die Erwartungen. Ein Radar-Magnet-Messwagen wurde entwickelt und auf zwei Brückenbauwerken erfolgreich erprobt. Die effektive komplexe DK konnte gut bestimmt werden.

Examination of Ground Penetrating Radar in combination with magnetic techniques for the determination of moisture and salinity of concrete bridge decks with asphalt cover

In order to evaluate the condition of concrete bridge decks, it is important to know the moisture and salinity of the reinforced concrete. Usually, the salinity is determined by electrical potential measurement at the concrete surface and verified by laboratory analysis of drill samples. This technique, however, requires the removal of the asphalt covering. For nondestructive evaluation of the concrete quality with respect to moisture and salinity by means of a vehicle-based measurement system, a combination method involving ground penetrating radar (GPR) and magnetic field measurement was developed. If the complex electrical permittivity (dielectric constant) of a construction material in the microwave frequency range is known, it is possible to derive its moisture and salinity using calibration curves. With a 1 GHz GPR, the traveling time of the electromagnetic waves from the road surface to the upper reinforcement layer is measured. The depth of these reinforcement bars are determined independently using a static magnetic field measurement. The bars are magnetized, the components of their remanent magnetic field are measured and the distance to the magnetometer sensors are calculated from the derivatives of the field. The results of this magnetic depth determination technique are independent of the dielectric properties of the materials in between. From the comparison of the radar reflection time with the magnetically determined depth, the real component of the permittivity is derived. The analysis of the reflected radar amplitude allows an estimate of the salinity. Additionally, a dielectric resonator was developed for moisture and salinity measurement of materials. It consists of a cylindrical microwave ceramics with high permittivity in an half-open metal enclosure. From the measurement of the resonance frequency and the quality factor during contact with the material, its moisture and salinity can be determined. Experiments were conducted using concrete blocks with known moisture and salinity. The results confirmed the expectations. A Radar-magnetic measurement vehicle was developed and successfully tested on two highway bridges. The effective complex dielectric permittivity could be determined well.

Inhalt

Kurzfassung – Abstract.....	3
1 Einleitung	7
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	7
2.1 Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Baustoffen	7
2.2 Messverfahren zur Bestimmung des Salzgehalts von Baustoffen	10
2.3 Dielektrizitätszahl von Baustoffen als Funktion von Feuchte und Salzgehalt.....	10
2.4 Magnetische Tiefenbestimmung	11
2.5 Konsequenzen für dieses Vorhaben	12
3 Entwicklung des Messsystems.....	13
3.1 Entwicklung des Magnetfeld-Messkopfs	13
3.1.1 Mathematische Grundlagen zur Tiefenbestimmung aus Restfeldsignalen.....	13
3.1.2 Numerische Auswertung der Messsignale.....	14
3.1.3 Numerische Simulation der Tiefenbestimmung	16
3.1.4 Aufbau der Magnetmessköpfe	17
3.1.5 Magnetische Probemessungen im Labor.....	18
3.1.6 Fazit.....	20
3.2 Entwicklung des Radar-Messkopfs	20
3.2.1 Mathematische Betrachtung zur Bestimmung der komplexen Dielektrizitätszahl.....	20
3.2.2 Durchführung von Radar-Messungen mit dem RAMAC-Georadar.....	22
3.2.3 Modifizierung der Auswerte-Software	23
3.3 Entwicklung und Aufbau des Radar-Magnet-Messwagens.....	25
4 Entwicklung eines dielektrischen Hochgüte-Resonators für die Feuchte- und Salzmessung.....	27
4.1 Halboffener Resonator	27
4.1.1 Aufbau des Resonators.....	27
4.1.2 Finite-Elemente-Simulation	28
4.1.3 Messungen an Kalksandsteinen	30
4.1.4 Fazit.....	30
4.2 Resonator mit Lochblende.....	31
4.2.1 Aufbau des Resonators.....	31
4.2.2 Finite-Elemente-Simulation	31
4.2.3 Messungen.....	32
4.2.4 Analytische Beschreibung	33
4.2.5 Fazit.....	33
4.3 Resonator für 2.48 GHz.....	34
4.3.1 Aufbau des Resonators.....	34
4.3.2 Finite-Elemente-Simulation	34
4.3.3 Messungen.....	35
4.3.4 Analytische Beschreibung	35
4.3.5 Fazit.....	36
4.4 Zusammenfassung.....	36
5 Messungen am Beton-Probekörpern.....	37
5.1 Chlorid-Probekörper der BAST.....	37
5.1.1 Herstellung des Chlorid-Probekörpers	37
5.1.2 Magnetische Messungen	38
5.1.3 Radar-Messungen.....	38
5.1.4 Auswertung	38
5.1.5 Fazit.....	39
5.2 Neubetonierung der Chloridnester	40

5.2.1 Motivation	40
5.2.2 Radar-Messungen.....	40
5.2.3 Resonator-Messungen	41
5.2.4 Fazit.....	41
5.3 Kleine Beton-Referenzkörper	41
5.3.1 Motivation	41
5.3.2 Resonator-Messungen	42
5.3.3 Radar-Messungen.....	42
5.3.4 Fazit.....	44
5.4 Asphalt-Überdeckung	44
5.4.1 Motivation	44
5.4.2 Radar-Messungen.....	44
5.4.3 Fazit.....	45
6 Messungen auf Bauwerken	46
6.1 Talbrücke Uttrichshausen.....	46
6.2 Döllbachtalbrücke	46
6.3 Fazit.....	48
7 Zusammenfassung	49
Beteiligte Mitarbeiter	50
Literatur.....	50

1 Einleitung

Brücken- und Ingenieurbauwerke bilden als ein wesentlicher Teil des Straßennetzes das Rückgrat des Transportwesens in Deutschland. Ihr einwandfreier Zustand hat eine enorme wirtschaftliche Bedeutung und demzufolge hat eine Beschädigung von Brückenbauwerken weitreichende ökonomische Konsequenzen. Die steigende Beanspruchung durch den zunehmenden Verkehr, vor allem dem Schwerlastverkehr, das Altern der Bauwerke und Schwierigkeiten mit der Dauerhaftigkeit älterer Betonstrukturen können zu schwerwiegenden Verkehrsbehinderungen führen, die volkswirtschaftliche Nachteile nach sich ziehen.

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung, Bereitstellung und Erprobung eines Mess-Systems, das durch die Kombination von Bodenradar- und Gleichfeldmagnetik-Sensorsystemen eine zerstörungsfreie, schnelle, zuverlässige und kostenminimale On-Line-Inspektion von Brückenfahrbahnplatten aus Beton auf den Grad der Korrosionsgefährdung der Bewehrung sowie die Ausbildung von Unterläufigkeiten hin erlaubt. Das Magnetfeld-Messsystem soll zur Tiefenbestimmung der Bewehrung ohne Vorkennntnis des Querschnittes oder der Materialparameter wie Leitfähigkeit und magnetische Permeabilität verwendet werden. Die erforderliche remanente Magnetisierung des Bewehrungsstahls wird durch einen mitgeführten Magnet erzeugt. Mit mehreren Magnetometer-Sensoren werden Komponenten des Magnetfeld-Gradientensensors gemessen und daraus die Tiefe der Stähle unabhängig von ihren Materialeigenschaften bestimmt. Aus der Kenntnis der exakten Betonüberdeckung der Bewehrung können die für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Beton relevanten Stoffparameter bestimmt werden. Insbesondere ist es möglich, auf diese Weise eine Tiefenkalibration der Radarmessung vorzunehmen und die Dielektrizitätskonstante des Beton lokal zu bestimmen. Daraus kann auf Schädigungsbereiche im Beton infolge Durchfeuchtung und erhöhten Chloridgehalts geschlossen werden. Um die Inspektion zur Vermeidung von Staus unter Verkehr durchführen zu können, wird das Sensorsystem so ausgelegt, dass die Untersuchung mobil von einem KFZ aus mit einer Fahrgeschwindigkeit von 5-20 km/h durchführbar ist.

Mit den Ergebnissen des Projektes soll eine Datengrundlage für die Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton geschaffen werden. Das Magnetfeldverfahren zusammen mit dem Georadarverfahren ermöglicht es, nach einer Messfahrt vor Ort feuchte und chloridverseuchte Bereiche mit evtl. bereits korrodiertem Beweh-

rungsstahl schnell und wirtschaftlich zu lokalisieren und dadurch den Eingreifzeitpunkt für Erhaltungsmaßnahmen genauer bestimmen zu können.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Stand der Technik in der Detektion von Schäden an Brückenfahrbahnplatten, insbesondere die Lokalisierung von durchfeuchteten und chloridverseuchten Bereichen im Beton, die Korrosion der Stahlbewehrung und von Spanngliedern zur Folge haben können, sind das Potentialverfahren, der Chloridnachweis und verschiedene, meist elektromagnetische Methoden der Feuchtebestimmung. Eine detaillierte Auflistung findet sich in Kap. 2.1.

Zur Ortung der Bewehrungskorrosion in Stahl- und Spannbeton wird die Differenz der elektrochemischen Potentiale zwischen der Bewehrung und einer außen aufgebrachtene Bezugelektrode gemessen [1]. Zur flächenhaften Potentialfeldmessung sind Messsysteme mit verschiedener Anzahl von Radelektroden entwickelt worden, die über die zu untersuchende Bauwerksoberfläche gefahren werden. Die dabei kontinuierlich gewonnenen Messwerte ermöglichen eine bildgebende Darstellung des Potentialfeldes. Es muss allerdings die Fahrbahn abgefräst werden, so dass die Betonoberfläche frei liegt, und es muss eine elektrisch leitende Verbindung zur zu prüfenden Bewehrung hergestellt werden.

Die zuverlässige Bestimmung des Chloridgehaltes des Beton an Brückenbauwerken ist nur lokal durch Entnahme von Bohrkernen und aufwendigen Labor-Untersuchungen der Proben möglich [2].

2.1 Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Baustoffen

Die gängigsten Methoden und Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Baustoffen wurden in der Übersichtsliteratur [3,4,5] recherchiert. Eine übersichtliche Zusammenstellung in Form einer Liste findet sich in Tab. 1.

Tab. 1. Messverfahren zur Feuchtemessung an Baustoffen.

Physikalisches Prinzip	Methode	Prinzip	Durchführung Probennahme	Bemerkung
Gravimetrisch	Darr-Wäge-Verfahren [6]	Wägung vor und nach Trocknung bei 105 °C	Bohrkern oder Bohrmehl	Referenzverfahren
Chemisch	Kalzium-Karbid-Verfahren (CM-Methode) [7]	Vermischung mit Kalziumkarbid im Druckbehälter, Druckanstieg durch Acetylgasbildung Maß für Feuchte	Bohrmehl	Standardverfahren in der Baupraxis
Thermometrisch	λ -Nadelsonde [8]	Wärmeleitfähigkeitsmessung mit Punktheizquelle und Temperatursensor	Einstecken der Sonde mind. 60 mm tief	Nur für weiche Materialien (z.B. Dämmstoffe) geeignet
Hygrometrisch	Sorption [9]	Sorptionsisothermen in einem geschlossenen Volumen	geschlossenes Volumen im Baustoff	Baupraktisch nicht relevant
Akustisch	Akustische Impedanz [10]	Messung der akustischen Impedanz des Baustoffs im Audio- oder Ultraschall-Bereich	z.B. Einbringen eines Resonators in ein Bohrloch	Zahlreiche andere Einflussgrößen
Optisch	Transiente (Impuls-) Thermografie [11]	Kontrollierte Erwärmung der Bauteiloberfläche, bildgebende Oberflächentemperaturmessung.	zerstörungsfrei	Zahlreiche andere Einflussgrößen, nur qualitative Aussagen möglich
	IR-Reflektografie [12]	Vergleich von Infrarotbildaufnahmen bei verschiedenen Wellenlängen (mit und ohne Wasserabsorption)	zerstörungsfrei	Zahlreiche andere Einflussgrößen, nur qualitative Aussagen möglich
Kernphysikalisch	γ -Strahlung [13]	γ -Strahlen-Abschwächung als Maß für Feuchte und Salzgehalt	zerstörungsfrei	Strahlenschutz, Feuchte- und Salzgehalt nicht trennbar
	Neutronensonde [14], Prompt- γ -Neutronen-Aktivierung [15]	Abbremsung schneller Neutronen durch Wasserstoffkerne, Messung der thermischen Neutronen oder der Prompt- γ	zerstörungsfrei	Strahlenschutz, sehr selektiv, auch Kristallwasser wird gemessen
	Kernspinresonanz Nuclear Magnetic Resonance (NMR) [16]	Messung der elektromagn. Absorption durch Präzession der Wasserstoffatome in starkem statischen magnetischen Feld	Bohrproben oder völlig zerstörungsfrei durch Aufsatztechnik	Aufwändiges, teures Verfahren, auch Kristallwasser wird gemessen
Elektromagnetisch	Elektroden, Wenner-Sonde [17]	Vier-Punkt-Gleichstrom-Messung des ohmschen Widerstandes	Evtl. Kontaktbohrungen, sonst zerstörungsfrei	Problem der Kontaktwiderstände, Störgrößen Elektrolyte, Inhomogenitäten
	Dielektrische Feuchtemessung [18]	Messung der Dielektrizitätszahl mit Plattenkondensator im Frequenzbereich bis 100 MHz	i.a. zerstörungsfrei	Feuchte- und Salzgehalt nicht trennbar, elektrochemische Störeffekte
	Radar [19]	Messung der elektromagnetischen Impulsantwort	zerstörungsfrei	Etabliertes universelles Verfahren
	Time Domain Reflectometry (TDR) [20]	(Laufzeit und Amplitude) im GHz-Bereich, in Reflexion oder Transmission, mono- oder bistatische Antennenkonfiguration	2 Bohrlöcher für Gabelsonde	Trotz Bohrungen nur eingeschränkt tiefenaufgelöst
	Mikrowellen-Transmission [21,22]	Verstimmung und Verbreiterung der Resonanz	1 oder 2 Bohrlöcher oder beidseitiger Zugang	Tiefenauflösung, bei hohen Freq. Streuung an Inhomogenitäten
	Mikrowellen-Resonator [23]	Verstimmung und Verbreiterung der Resonanz	zerstörungsfrei	Geringe Eindringtiefe, keine Tiefenauflösung

Da im Rahmen dieses Vorhabens nur elektromagnetische Verfahren untersucht werden sollen, wird im folgenden nur auf diese weiter eingegangen. Bei der dielektrischen Feuchtemessung mit Frequenzen bis 100 MHz [4,18] wird das zu messende Material zwischen oder unter zwei Kondensatorplatten gebracht und die Kapazitätsänderung im Vergleich zur trockenen Umgebung gemessen. Wegen der hohen statischen Dielektrizitätskonstante von Wasser ($\epsilon \sim 80$) wächst die gemessene Kapazität mit steigender Feuchte. Die dielektrische Feuchtemessung eignet sich gut zur vergleichenden Bestimmung der relativen Durchfeuchtung verschiedener Betonbereiche desselben Bauwerks. Allerdings hat die Positionierung des Messgerätes ebenso einen Einfluss auf den Messwert wie die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit). Ein weiterer Nachteil ist die große Abhängigkeit des Messwertes vom Salzgehalt des Baustoffs. Bei den üblicherweise verwendeten Frequenzen von 1 bis 100 MHz sind Salzgehalt und Feuchtigkeit nicht trennbar [3]: ein durchsalzener trockener Baustoff liefert die gleiche Anzeige wie ein salzreicher feuchter. Für die Absolutmessung der Feuchtigkeit ist das Verfahren daher wenig geeignet. Es können mit diesem Verfahren nur Oberflächenfeuchtigkeiten bis zu einer Tiefe von wenigen cm gemessen werden. Zur Messung durch die Asphaltdecke hindurch ist das Verfahren nicht geeignet.

Im Mikrowellen-Frequenzbereich (1 – 10 GHz) hingegen ist es möglich, durch die Messung der Real- und Imaginärkomponente der Dielektrizitätszahl des Baustoffs, den Feuchte- und den Salzgehalt unabhängig voneinander zu bestimmen [3]. Hierzu sind eine Reihe von Messtechniken bekannt. Über Transmissionsmessungen mit Positionierung der Antennen auf gegenüberliegenden Seiten des Baustoffs (7 GHz-Messung von Maierhofer et al. [24]), in zwei parallelen Bohrlöchern [21], oder einer Microstrip-Patch-Sendeantenne außen und einer verschiebbaren Dipol-Empfangsantenne in einem Bohrloch [22] ist berichtet worden. Auch die Time Domain Reflectometry mit einer Gabelsonde [20] benötigt zwei Bohrlöcher, die Resonatormethode [23] hingegen kommt ohne aus, allerdings auf Kosten einer reduzierten Eindringtiefe und Tiefeninformation über die Durchfeuchtung.

Das universellste Mikrowellen-Verfahren, das sich prinzipiell zur Bestimmung der ortsabhängigen Dielektrizitätszahl von Baustoffen eignet, ist das Radar-Verfahren [25,26,27,29]. Es beruht auf dem Impuls-Echo Prinzip: Von einem Impulsgenerator werden kurze hochfrequente elektromagnetische Impulse (Wellenzüge) von ca. 1 ns Länge erzeugt,

die von der Sendeantenne in das zu untersuchende Material abgestrahlt wird. Von der Empfangsantenne werden die Rückstreu-Impulse aufgezeichnet. Der Impuls mit der Frequenz von etwa 1 GHz bewegt sich im Medium mit einer materialabhängigen Geschwindigkeit v , die umgekehrt proportional zur Wurzel der Dielektrizitätskonstante ϵ des Mediums ist.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

Er wird an Grenzflächen reflektiert, an denen sich die dielektrischen Eigenschaften des Materials ändern, und von der Empfangsantenne detektiert. Reflexionen treten insbesondere an der Oberfläche und der Rückseite der zu untersuchenden Strukturen sowie an Inhomogenitäten im Material auf. Beim Übergang der Welle von einer Schicht in eine andere Schicht unterschiedlicher Dielektrizitätskonstante ϵ und elektrischer Leitfähigkeit σ wird ein Teil der einfallenden elektromagnetischen Welle reflektiert. Die an Diskontinuitäten der Dielektrizität reflektierten elektromagnetischen Wellen werden mit der Empfangsantenne registriert und zeit aufgelöst auf einem Display dargestellt. Unterschiedliche Signallaufzeiten entsprechen dabei unterschiedlichen Tiefen, so dass eine Tiefenauflösung der gemessenen Strukturen möglich ist. Aus der Laufzeit des in einer Empfängerantenne gemessenen „Echos“ kann mit Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen die Tiefe des Reflektors bestimmt werden. Mit einer 1 GHz-Antenne erreicht man eine Eindringtiefe von ca. 0.5 – 1 m in trockenem Beton.

$$t = \frac{2}{v} z = \frac{2\sqrt{\epsilon}}{c} z \quad (2)$$

Fahrzeuggestützte Radaruntersuchungen werden zur Analyse des Schichtaufbaus, zur Dickenbestimmung und zur Ortung von Ablösungen an mehrschichtigen Bauteilen durchgeführt, z. B. zur Dickenmessung von Betonsohlplatten und von Straßenbelägen und zur Ortung von Ablösungen [27]. Radar eignet sich sehr gut zur Lokalisierung von schlaffer und vorgespannter Bewehrung in Beton sowie von metallischen Ankern und Trägern in Mauerwerk [28,29]. Sowohl die Intensitäten der Reflexionen als auch die Laufzeiten sind abhängig von den dielektrischen Eigenschaften. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material bekannt, so lässt sich aus der Laufzeit die Position des Reflexionszentrums bestimmen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Realteil der Dielektrizitätskonstante und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Temperatur und vom Feuchtegehalt abhängt. Dieser Effekt wird bei der

Tab. 2. Messverfahren zur Messung des Salzgehalts von Baustoffen.

Physikalisches Prinzip	Methode	Prinzip	Durchführung Probennahme	Bemerkung
Chemisch-Analytisch	Chlorid-Nachweis [2]	Vermischung mit Kalziumkarbid im Druckbehälter, Druckanstieg durch Acetylen gasbildung Maß für Feuchte	Bohrmehl	Standardverfahren in der Baupraxis, kann auch vor Ort durchgeführt werden
	Atom-Absorptions-Spekt. [30] RFA, XRD [31]	Resonanz-Absorption in der Gasphase Röntgenstreu/fluoresz	Bohrmehl	Aufwändige chemische Laboranalysen
Spektroskopisch	Laser-induzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) [32]	Optische Anregung d. verdampften Materials und spektrale Analyse der Fluoreszenz	Oberflächliches Aufschmelzen durch Funken oder Laser	Analyse direkt am Bauwerk möglich, sehr aufwendig
Kernphysikalisch	γ -Strahlung			
Elektromagnetisch	Mikrowellen-Transmission, TDR, Resonator		siehe Tabelle I	
Elektrochemisch	Potentialverfahren [1,33]	Differenz der elektrochemischen Potentiale zwischen Bewehrung und Referenzelektrode	glatte, befeuchtete Oberfläche, elektr. Kontakt zur Bewehrung	Misst nicht den Salzgehalt, sondern weist aktive Korrosion elektrochemisch nach

Durchführung von Feuchtemessungen ausgenutzt. Der Salzgehalt beeinflusst ebenfalls die Ausbreitungsgeschwindigkeit, allerdings wirkt er sich im typischen Radar-Frequenzbereich um 1 GHz hauptsächlich auf den Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante aus, die für die Absorption der Radarwellen verantwortlich ist. Bei dieser Frequenz ist es möglich, aus der genauen Kenntnis der komplexen Dielektrizitätszahl eine unabhängige Bestimmung von Feuchte und Salzgehalt vorzunehmen [3].

2.2 Messverfahren zur Bestimmung des Salzgehalts von Baustoffen

Ebenso wurden die gängigsten Methoden und Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Baustoffen in der Übersichtsliteratur [3,4,5] recherchiert. Aus der Auflistung der Verfahren in Tab. 2 geht klar hervor, dass sich nur elektromagnetische Methoden zu einer zerstörungsfreien, flächigen Untersuchung des Chloridgehaltes des Betons eignen.

2.3 Dielektrizitätszahl von Baustoffen als Funktion von Feuchte und Salzgehalt

Das dielektrische Verhalten von Wasser wird von den Dipoleigenschaften seiner Moleküle bestimmt.

Bild 1 zeigt den Frequenzverlauf der komplexen Dielektrizitätszahl von Wasser.

Der Übergang des Realteils ϵ' der DK vom statischen Grenzfall $\epsilon_{st} \approx 80$ zum hochfrequenten Grenzfall $\epsilon_{\infty} \approx 3.2$ wird durch die Relaxationsfrequenz der Wassermoleküle bestimmt, die zu einer breiten Resonanzabsorptionsbande im Imaginärteil ϵ'' führen. In porösen Baustoffen ist das Wasser jedoch nicht frei, sondern an den Porenwänden physikalisch gebunden. Je fester diese Bindung ist, desto niedriger liegt die Resonanzfrequenz.

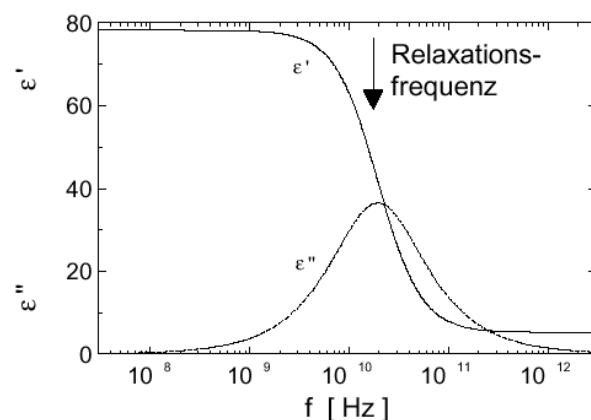


Bild 1. Realteil und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl (DK) von Wasser bei 25°C, nach [3].

Der Frequenzbereich unterhalb dieser Relaxationsfrequenz, d.h. der Bereich von 1 – 10 GHz, ist für die Feuchtemessung besonders gut geeignet,

da sich die DK's des trockenen Baustoffs und von Wasser dort besonders stark unterscheiden. Zur Bestimmung der effektiven DK von Systeme, die aus einem Gemisch von mehreren Phasen bestehen (im Falle feuchter poröser Baustoffe etwa die drei Phasen trockener Baustoff, Wasser und Luft), sind zahlreiche Mischungsmodelle entwickelt worden [34]. Laut Schlemm [35] eignet sich das Complex Refractive Index (CRI)-Modell besonders gut zur Beschreibung von verschiedenen porösen Baustoffen, insbesondere Sandsteine, Kalksandsteine und Ziegel. Danach skaliert der komplexe Brechungsindex $\sqrt{\varepsilon'}$ gemäß dem Volumen-Verhältnis der Brechungsindizes der Konstituenten. Die Formel lautet (vgl. Gl (5.2) aus [35]):

$$u_v(\varepsilon') = \frac{\sqrt{\varepsilon'} - \sqrt{\varepsilon'_m}}{\sqrt{\varepsilon'_w} - \sqrt{\varepsilon'_m}} \cdot 100 \quad (3)$$

Aufgelöst ergibt sich

$$\varepsilon''(u_v) = \left[\frac{u_v}{100} (\sqrt{\varepsilon'_w} - \sqrt{\varepsilon'_m}) + \sqrt{\varepsilon'_m} \right]^2 \quad (4)$$

Der Salzgehalt ergibt sich mittels eines Ansatzes

$$\sqrt{\varepsilon''} = a \sqrt{\frac{s_m}{u_v}} \quad \text{für den Imaginärteil der DK bei Ver-}$$

wendung des CRI-Modells (vgl. Formel (5.11) von Schlemm [35]):

$$\varepsilon''(u_v, s_m) = \left[\frac{u_v}{100} \left(\sqrt{\frac{a \sqrt{s_m}}{\sqrt{u_v}}} - \sqrt{\varepsilon''_m} \right) + \sqrt{\varepsilon''_m} \right]^2 \quad (5)$$

mit den Parametern

$$\begin{aligned} \varepsilon'_m &= 3.86 \pm 0.39 \\ \varepsilon'_w &= 92.56 \pm 0.39 \\ a &= 493.4 \pm 38.5 \\ \varepsilon''_m &= 0.35 \pm 0.05 \end{aligned} \quad (6)$$

Diese Parameter sind von Schlemm aus Fits seiner Resonator-Messungen bei 2.45 GHz an die Gleichungen bestimmt worden, und zwar gemittelt für alle porösen Baustoffe mit Ausnahme von Porenbeton. Bild 2 gibt den Zusammenhang graphisch wieder.

Eine wichtige Konsequenz dieser skizzierten Abhängigkeit der komplexen DK des Baustoffs von seinem Feuchte- und Salzgehalt ist die folgende Aussage: Ist die komplexe DK eines Baustoffs bekannt, so lässt sich seine Feuchte bestimmen. Vorausgesetzt, dass der Baustoff nicht zu trocken ist (Schlemm gibt hier als Erfahrungswert eine Mindestfeuchte von 5 Vol.% an), lässt sich auch der Salzgehalt des Baustoffs bestimmen, und zwar unabhängig davon, wie feucht er ist.

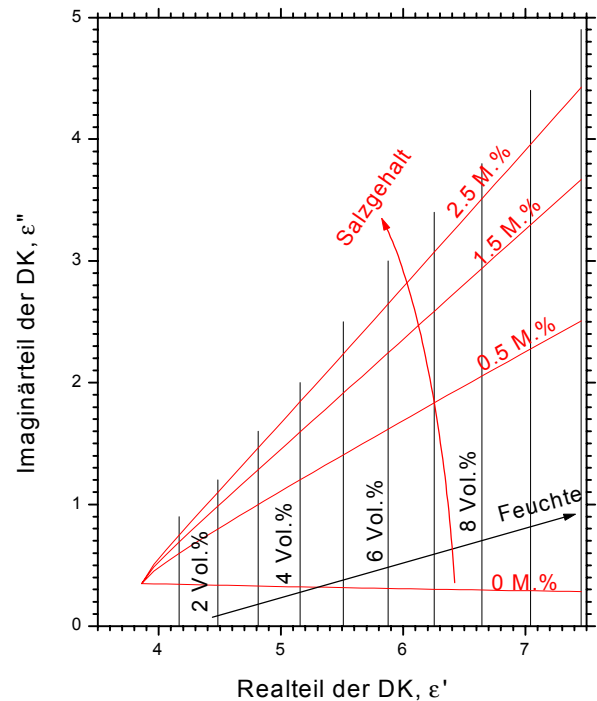


Bild 2. Realteil und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl (DK) von Baustoffen bei 2.45 GHz als Funktion der Feuchte und des Salzgehaltes, berechnet nach Schlemm [35] mit den dort angegebenen Formeln (5.2) und (5.11).

2.4 Magnetische Tiefenbestimmung

Zur Bestimmung der Betondeckung bzw. der Tiefe von Bewehrungsseisen im Bauwerk finden zwei elektromagnetische Verfahren in der Praxis Anwendung [4,36]: das Wirbelstrom- und das Gleichfeld-Verfahren.

Bei der Wirbelstrom- oder Wechselfeldmethode erzeugt eine Primärspule über eine angelegte Wechselspannung eine Induktionsspannung in einer Sekundärspule. Die Größe der induzierten Spannung stellt ein Maß für den Anteil und den Abstand von elektrisch leitendem bzw. magnetisierbarem Material in der Umgebung dar. Bei bekanntem Durchmesser der Bewehrung ist eine Abstandskalibrierung möglich. Nach Ricken/Mehlhorn [37] kann bei der Wirbelstrommethode der Einfluss der Betondeckung und des Stabdurchmessers durch Bewertung des real und des imaginär Anteils des Wirbelstromsignals nahezu vollständig unterschieden werden. Für die Bestimmung der Betondeckung wird demnach der Imaginäranteil des Signals verwendet.

Im praktischen Einsatz können jedoch viele Störgrößen auftreten, z.B. Kreuzungspunkte, Bau-

werkskanten oder Bereiche geringen Bewehrungsabstandes. Weitere Einflussgrößen sind der Stahldurchmesser und letztlich auch die Stahlzusammensetzung [4], die Leitfähigkeit des Betons, sowie die Verfahrensgeschwindigkeit des Prüfkopfes, der bei hoher Geschwindigkeit eine zusätzliche Wirbelstromquelle darstellt. Beim Gleichfeld-Streulungsverfahren erfolgt eine Magnetisierung der Bewehrung mit einem Dauermagneten, wobei das Magnetfeld durch die ggf. vorhandene - magnetisierbare - Bewehrung gestreut wird. Der Vergleich des mit einem Magnetfeld-Detektor (z.B. Hallsonde) gemessenen Feldes und dem Feld eines Kalibrierkörpers liefert einen Wert für die Betondeckung. Das Verfahren kann auch zur Bestimmung des Durchmessers der Bewehrung verwendet werden. Das Gleichfeldverfahren hat gegenüber dem Wechselfeldverfahren den Vorteil, dass das Verfahren von der elektrischen Leitfähigkeit, der chemischen Zusammensetzung und dem Gefügezustand des Eisens praktisch unabhängig ist [38]. Nur die magnetische Permeabilität des Werkstoffs beeinflusst den Messwert.

Eine Verbesserung dieses Verfahrens, das auf der Messung mehrerer Komponenten des Magnetfeld-Gradientensors basiert und das die Tiefe der Stähle unabhängig von ihrem Durchmesser, ihrem Magnetisierungszustand und ihrer Permeabilität bestimmt, wurde kürzlich von Sawade und Krause vorgeschlagen und sowohl in FEM-Simulationsrechnungen als auch experimentell bestätigt [39].

2.5 Konsequenzen für dieses Vorhaben

Fazit ist, dass das Georadar-Verfahren als einziges zerstörungsfreies Verfahren prinzipiell eine fahrzeuggestützte Messung der Durchsalzung und Durchfeuchtung von Beton-Brückenplatten durch den Asphaltbelag hindurch ermöglicht. Mikrowellen-Resonatormethoden haben keine hinreichende Eindringtiefe. Allerdings ist es erforderlich, eine unabhängige Kalibration der Tiefenskala vorzunehmen. Dies kann durch eine magnetische Messung der Tiefe von Bewehrungseisen geschehen. Zu beachten ist allerdings, dass zur Bestimmung des Salzgehalts eine Mindest-Feuchte von ca. 5% erforderlich ist.

3 Entwicklung des Messsystems

Das vorgeschlagene und im Rahmen dieses Vorhabens untersuchte Verfahren basiert auf einer simultanen Messung der statischen Magnetfelder und einer Radar-Messung der Reflektionszeit für 1 GHz-Mikrowellen von Bewehrungseisen. Diese Bewehrungsbügel sind typischerweise in Beton-Brückenplatten in einem ziemlich dichten Gitter vorhanden. Mit der Messung des remanenten magnetischen Feldes der vorher aufmagnetisierten Bügel ist es möglich, ihre Tiefe (Überdeckung) genau zu bestimmen. Diese quasi-statische Magnetfeldmessung ist völlig unabhängig von der Dielektrizitätszahl des Betons, in den die Bügel eingebettet sind. Die Geschwindigkeit der Radarwellen hingegen hängt hauptsächlich vom Realteil der Dielektrizitätszahl des Beton ab. Vergleich dieser beiden Tiefenbestimmungen gestattet es, den Feuchte- und/oder Salzgehalt des Betons abzuschätzen. Bild 3 zeigt prinzipiell, wie ein derartiger Messwagen aussehen könnte, mit dem eine Gleichfeld-Magnetik und Radar-Reflektionsmessung während langsamer Fahrt über die Brückenfahrbahn durchgeführt werden könnten.

3.1 Entwicklung des Magnetfeld-Messkopfs

3.1.1 Mathematische Grundlagen zur Tiefenbestimmung aus Restfeldsignalen

Die Methode der magnetischen Tiefenbestimmung basiert auf der Messung des remanenten Magnetfeldes der Querbügel nach Magnetisierung mittels eines Permanentmagneten.

Aufgrund des ferromagnetischen Materialverhaltens der Stahlbewehrung verbleibt nach einer vorangegangenen Bauteil-Magnetisierung und unter dem Einfluss des Erdmagnetfeldes in der Bewehrung eine remanente Magnetisierung. Die Bügel-

bewehrungen können als linienförmig, d.h. eindimensional betrachtet werden. Das betrachtete Bewehrungseisen verlaufe in y -Richtung, werde also durch die Koordinaten (x_B, s, z_B) beschrieben.

Alle relevanten Größen (Querschnitt A und Magnetisierung M) sind als Funktionen des Parameters s anzusehen. Wie in [40] gezeigt wurde, ist die Magnetisierung M der als drahtförmig anzusehenden Bewehrung parallel zur Längsachse des Bewehrungselements orientiert. Damit kann die Magnetisierungsverteilung der Bewehrung durch

$$M = M(s) \quad (7)$$

beschrieben werden. Das magnetische Potential des durch die Bewehrung verursachten magnetischen Streufeldes ergibt sich zu

$$\psi = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d[A(s)M(s)]}{ds} \frac{ds}{\sqrt{(x-x(s))^2 + (y-y(s))^2 + (z-z(s))^2}} \quad (8)$$

Der Parameter s umfasst die gesamte Bewehrung. Der Querschnitt A hängt ebenfalls vom Parameter s ab. Das magnetische Streufeld am Punkt (x, y, z) ergibt sich zu:

$$\vec{H} = -\text{grad } \psi \quad (9)$$

In Komponentenschreibweise gilt

$$\begin{aligned} H_x(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x-x(s)) \cdot \frac{d}{ds}[A(s)M(s)]}{r^3} ds \\ H_y(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(y-y(s)) \cdot \frac{d}{ds}[A(s)M(s)]}{r^3} ds \\ H_z(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(z-z(s)) \cdot \frac{d}{ds}[A(s)M(s)]}{r^3} ds \end{aligned} \quad (10)$$

Bei einem Querbügel, der senkrecht zur Scanrichtung x in einem konstanten Abstand z_B angeordnet

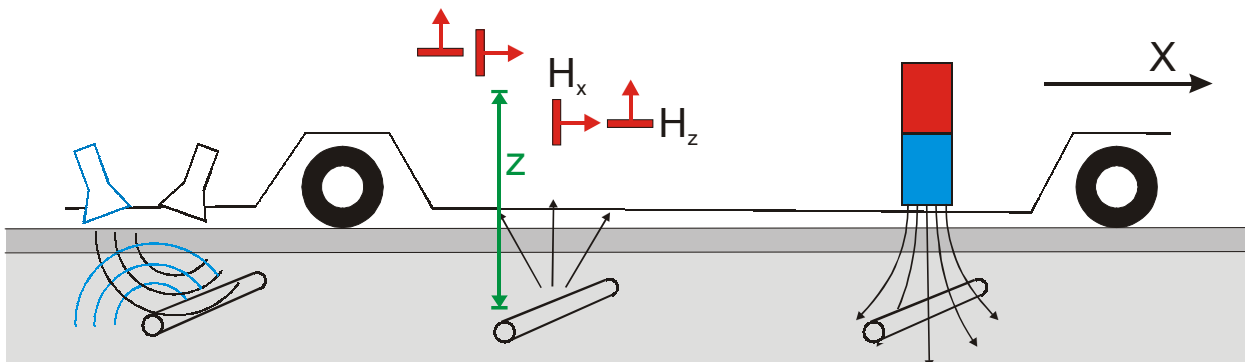


Bild 3. Prinzipische Skizze zum Aufbau eines Messwagens zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl (und damit des Feuchte- und Salzgehaltes) von bewehrtem Beton durch magnetische Messung der Positionen der Bewehrungsbügel und Radarmessung der Reflektionszeit von GHz-Mikrowellen.

ist, gilt:

$$z(s) = z_B, \quad x(s) = x_B \quad (11)$$

Aus den Gleichungen (10) ergibt sich eine einfache, fundamentale Beziehung zwischen den Restfeldkomponenten H_x und H_z :

$$(z - z_B) \cdot H_x(x, y, z) = (x - x_B) \cdot H_z(x, y, z) \quad (12)$$

Durch Differenzieren der Fundamentalgleichung (12) nach x ergibt sich für die Messebene $z = 0$:

$$z_B \cdot H_{x,x}(x, y, 0) = (x - x_B) \cdot H_{z,x}(x, y, z) + H_z(x, y, 0) \quad (13)$$

Dabei wurde die Notation $H_{x,x} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi$,

$$H_{x,z} \equiv H_{z,x} = \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \Psi \quad \text{und} \quad H_{z,z} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Psi \quad \text{verwendet.}$$

Wegen der Vertauschbarkeit der gemischten zweiten Ableitungen sind nur drei Komponenten unabhängig. Entsprechend werden die Feldgradienten

zweiter Ordnung mit $H_{x,xx} = \frac{\partial^3}{\partial x^3} \Psi$,

$$H_{x,xz} \equiv H_{x,zx} \equiv H_{z,xx} = \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial z} \Psi, \dots \text{ bezeichnet.}$$

Für $x = x_B$ vereinfacht sich Gl. (12) zu:

$$z_B = \frac{H_z(x_B, y, 0)}{H_{x,x}(x_B, y, 0)} \quad (14)$$

Durch zweifaches Ableiten von (12) nach x und z erhält man drei Bestimmungsgleichungen für die Bügeltiefe z aus Gradienten erster und zweiter Ordnung. Nur eine Beziehung, Gl. (15), ist gut zur Bügeltiefenbestimmung geeignet, die übrigen sind bei $x = x_B$ singularär und werden daher hier nicht betrachtet.

$$z_B = \frac{H_{z,z}(x_B, y, 0) - H_{x,x}(x_B, y, 0)}{H_{x,xz}(x_B, y, 0)} \quad (15)$$

Differenziert man ein drittes Mal nach x , so ergibt sich durch Auflösen nach z die folgende reguläre Beziehung für die Bügeltiefe z :

$$z_B = \frac{3H_{z,xx}(x_B, y, 0)}{H_{x,xxx}(x_B, y, 0)} \quad (16)$$

Bei n -facher partieller Differentiation nach x erhält man aus Gl. (12):

$$z_B = \frac{n \cdot \frac{\partial^{n-1} H_z(x_B, y, 0)}{\partial x^{n-1}}}{\frac{\partial^n H_x(x_B, y, 0)}{\partial x^n}} \quad (17)$$

Der Abstand z_B , d.h. der Abstand des magnetischen Schwerpunktes des Querbügels kann nach Gl. (17) aus den Ableitungen der x - und z -

Komponenten des durch die Querbügels verursachten Restfeldes bestimmt werden. Von besonderer Bedeutung sind die Terme mit ungeradem n , da die geraden Ableitungen der z -Komponente und die ungeraden Ableitungen der x -Komponente regulär bleiben. Gl. (17) enthält lediglich Gradienten in x -Richtung. Daher ist sie für die Auswertung von Messdaten gut geeignet, da in der Scan-Richtung die Gradienten je nach Anzahl der Abtastpunkte theoretisch beliebig genau bestimmt werden können.

Die Gleichungen (14) – (17) gelten für einen einzelnen Querbügel. Bei mehreren Querbügeln findet natürlich eine Überlagerung der Magnetfelder statt. Dieser Überlagerungseffekt kann durch Wahl eines höheren Parameters n reduziert werden, soweit dies durch die numerische Genauigkeit der Gradientenbestimmung möglich ist.

3.1.2 Numerische Auswertung der Messsignale

Für die Bestimmung der Feldgradienten gibt es folgende Möglichkeiten:

- Herstellung von Gradientensonden
- Messung der Feldkomponenten und anschließende numerische Gradientenbildung.

Im Rahmen des Vorhabens wurde die zweite Variante (Messung der Feldkomponenten und anschließende numerische Gradientenbildung) gewählt. Die Messwerte liegen hierbei in Form von diskreten äquidistanten Punktfolgen der Form vor:

$$H_{xk} = H_x(k\Delta x, y, 0) \quad (18)$$

Die Bestimmung der Gradienten kann mit direkten numerischen Differenzenquotienten vorgenommen werden:

$$\begin{aligned} \Delta^1 H(k) &= \frac{1}{2\Delta x} (H_{k+1} - H_{k-1}) \\ \Delta^2 H(k) &= \frac{1}{2\Delta x} (H_{k+1} + H_{k-1} - 2H_k) \\ \Delta^3 H(k) &= \frac{1}{2\Delta x} (-H_{k-2} + 2H_{k-1} - 2H_{k+1} + H_{k+2}) \end{aligned} \quad (19)$$

Vorraussetzung für die Anwendung der Gleichungen (19) ist ein hinreichend geringes Signalrauschen, d.h. die Messwerte müssen hinreichend glatt sein. Eine indirekte Methode zur Bestimmung höherer numerischer Ableitungen sind Glättungsfilter vom Typ „Savitzky-Golay“ [41,42]. Diese Filter werden dazu verwendet, um nichtkorrelierte, d.h. verrauschte Signalanteile mit der Best-Fit-Methode aus dem Signal zu entfernen. Das Verfahren wird bei Vorliegen äquidistanter Daten wie folgt vorge-

nommen. An jedem Datenpunkt werden Polynome bis zur Ordnung k angefitet:

$$\sum_{-n}^n [H(n_0 + i) - \sum_0^k p_m(n_0) \cdot i^m]^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (20)$$

$$n_0 = n, n+1, \dots, N_g - n$$

Die m -te Ableitung an der Stelle x_0 ist dann

$$\Delta^m H(n_0) = \frac{1}{\Delta x^m} m! \cdot p_m(n_0) \quad (21)$$

Für die Bestimmung der Koeffizienten $p_k(n_0)$ ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\sum_0^k p_m(n_0) \sum_{-n}^n i^{m+m_0} = \sum_{-n}^n i^{m_0} \cdot H(n_0 + i) \quad (22)$$

$$m_0 = 0, 1, \dots, k$$

In Matrizenform lautet Gl. (13):

$$\underline{\underline{D}} \cdot \vec{p}(n_0) = \vec{H}(n_0)$$

$$D_{m_0 m} = \sum_{-n}^n i^{m_0+m}$$

$$H_{m_0}(n_0) = \sum_{-n}^n i^{m_0} \cdot H(n_0 + i) \quad (23)$$

$$\vec{p}^T(n_0) = [p_0(n_0), \dots, p_k(n_0)]$$

Da bei äquidistanten Punkten die linke Seite von Gl. (22) immer gleich bleibt, ist es zweckmäßig, das Gleichungssystem zu invertieren. Mit der inversen Matrix K ergeben sich die Koeffizienten aus Gl. (23) zu:

$$\underline{\underline{K}} \cdot \underline{\underline{D}} = \underline{\underline{1}}$$

$$\vec{p}(n_0) = \underline{\underline{K}} \vec{H}(n_0) \quad n_0 = n, n+1, \dots, N_g - n \quad (24)$$

Für die Filterung des Messsignals wird der Vektor \vec{p} nach Gl. (24) an jedem Datenpunkt berechnet. Die höheren Ableitungen bis zur Ordnung k werden nach Gl. (21) berechnet.

Die charakteristischen Parameter bei diesem Filter sind die Mittelungslänge n , d.h. die Zahl der Datenpunkte über die gemittelt wird, und die höchste Polynom - Ordnung k , welche die höchste Ableitung berücksichtigt. Bei der Wahl dieser Parameter muss die Bedingung

$$k \leq n/2 \quad (25)$$

eingehalten werden. Für $k = 0$ geht dieser Filter in die Glättung über n Messwerte mit einem gleitendem Mittelwert über. Für die Filterung und Bestimmung höherer Differentialquotienten von Messsignalen, die als äquidistante Messwerte vorliegen, wurde ein entsprechendes Programm zur Lösung der Gleichungen (21) – (24) erstellt.

Das Verfahren wird an einem numerischen Beispiel demonstriert. Als Ausgangsfunktion $f(x)$ wird die Funktion

$$f(x) = p \cdot \frac{(x - x_B)}{((x - x_B)^2 + z_B^2)^{3/2}} \quad (26)$$

$$p = 100; x_B = 150 \text{ cm}; z_B = 10 \text{ cm}$$

mit einem stochastischem Anteil $0.1 \cdot \text{rnd}$, wobei rnd im Intervall $[-0.5, +0.5]$ gleichverteilt ist, überlagert. Die Funktion wird als äquidistante Reihe mit einem Abstand von 0.2 cm gegeben. In Bild 4 wird die Funktion dargestellt:

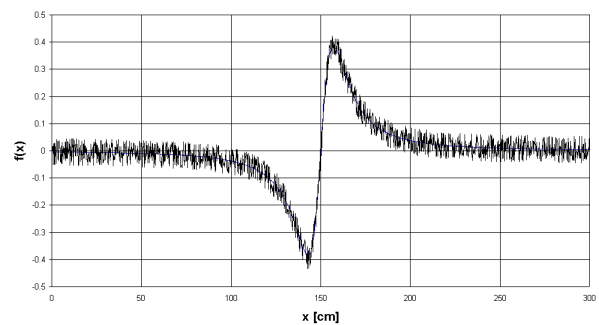


Bild 4. Ausgangsfunktion mit verrauschtem Signalanteil.

Bei der Filterung wird die Polynomordnung zu $k = 15$ und das Mittelungsintervall zu $n = 100$ gewählt. Die dritte Ableitung ist in Bild 13 dargestellt.

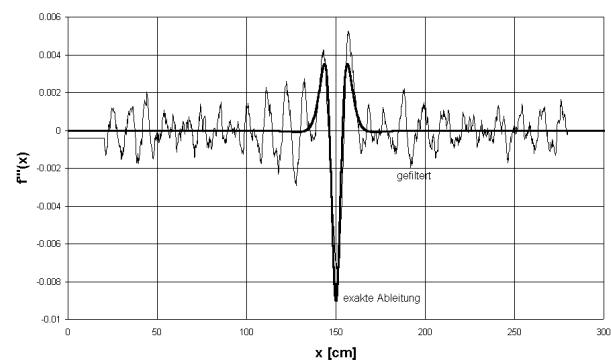


Bild 5. Filterung des Messsignals ($k=15, n=100$) - dritte Ableitung.

Bei der numerischen Ableitung entsprechend Gl. (19) wurden auch aus den zuvor geglätteten Funktionen nur verrauschte Signale gefunden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass bei der Anwendung des obigen Filters die Wahl der Parameter k und n natürlich von großem Einfluss auf die gefilterten Ergebnisse ist.

3.1.3 Numerische Simulation der Tiefenbestimmung

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der magnetostatischen Tiefenbestimmung wurden Simulationsrechnungen vorgenommen. Dabei wurde eine Bügelanordnung mit unterschiedlichen Tiefenlagen und Abständen der Bügel untersucht.

Die Magnetisierung wurde mit einem Jochmagneten (Jochlänge $L = 25$ cm) vorgenommen:

In Bild 6 sind die Geometrie und die Restfeldverläufe (unten: H_x , oben: H_z) dargestellt.

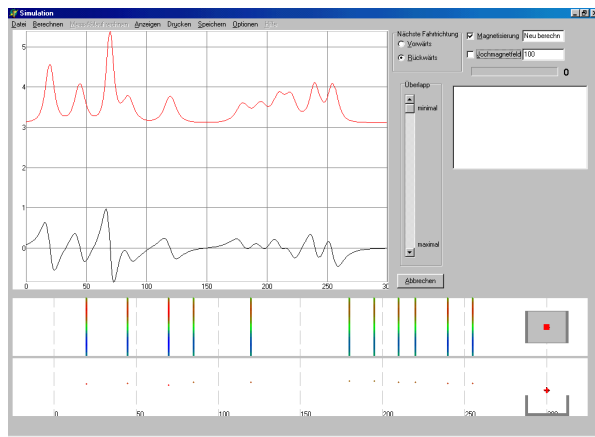


Bild 6. Simulierte Restfeldverläufe (Geometrie Test01).

Die Ableitungen der Restfeldverläufe sind in Bild 7 dargestellt.

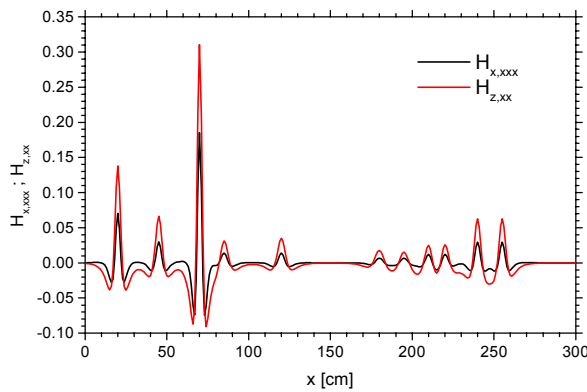


Bild 7. Ableitungen der Restfelder (schwarz: $H_{x,xxx}$; rot: $H_{z,xx}$).

Die Lage der Querbügel kann aus den lokalen Maxima der Ableitungen bestimmt werden. Bei der Auswertung der Tiefenlage nach Gl. (16) wurden die in Tab. 3 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

Tab. 3. Ergebnis der Simulationsrechnung Test01 und der Tiefenbestimmung nach Gl. (16) mit $dx = 1$ cm bzw. 0.5 cm.

Nr.	x_B	Z_B (Istwert)	Z_B ($dx = 1\text{cm}$)	Z_B ($dx = 0.5\text{cm}$)
1	20	5	5.8	5.4
2	45	6	6.6	6.1
3	70	4	5.0	4.2
4	85	7	6.6	6.2
5	120	7	7.6	7.1
6	180	8	7.8	7.4
7	195	8	6.7	6.4
8	210	7	6.2	5.8
9	220	7	6.3	5.9
10	240	6	6.3	5.8
11	255	6	6.4	5.9

Bei einer weiteren Simulation (Test03) wurde ein engerer Abstand der Bügel und eine größere Tiefe der Bügel untersucht (Bild 8 und Bild 9). Bei dem verwendeten Abstands-Tiefen-Verhältnis von 1.5:1 ist eine Ortung möglich, wenngleich die Tiefenbestimmung tendenziell zu kleine Tiefen ergibt.

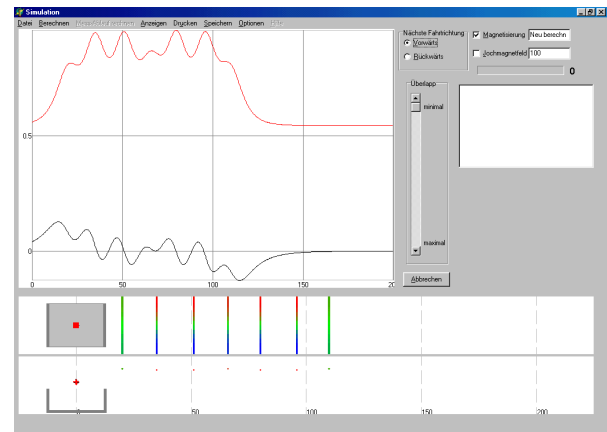


Bild 8. Simulierte Restfeldverläufe, Geometrie Test03.

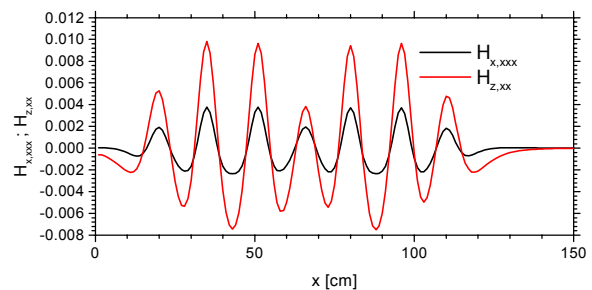


Bild 9. Ableitungen der Restfelder (schwarz: $H_{x,xxx}$; rot: $H_{z,xx}$), Geometrie Test03.

Bei der Tiefenbestimmung nach Gl. (16) wurden die in Tab. 4 dargestellten Ergebnisse gewonnen.

Tab. 4. Ergebnis der Simulationsrechnung Test03 und der Tiefenbestimmung nach Gl. (16) mit $dx = 1$ cm bzw. 0.5 cm.

Nr.	x_B	Z_B (Istwert)	Z_B ($dx = 1$ cm)	Z_B ($dx = 0.5$ cm)
1	20	10	8.8	7.7
2	35	9	7.8	7.7
3	51	9	7.7	7.2
4	66	10	5.9	5.8
5	80	9	7.6	7.2
6	96	9	7.8	7.4
7	110	10	7.9	7.5

Bei einem Verhältnis Abstand zu Tiefe von etwa 1:1 kann die Ortung ebenfalls noch vorgenommen werden (Bild 10), die Tiefenbestimmung nach Gl. (16) erbringt jedoch zu kleine Werte (Tab. 5).

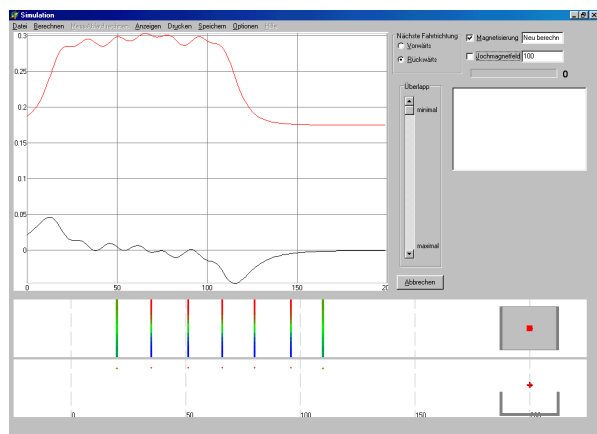


Bild 10. Restfeldverläufe, Geometrie Test02.

Tab. 5. Ergebnis der Simulationsrechnung Test02 und der Tiefenbestimmung nach Gl. (16) mit $dx = 1$ cm.

Nr.	x_B	Z_B (Istwert)	Z_B ($dx = 1$ cm)	Z_B ($dx = 0.5$ cm)
1	20	13	13	-
2	35	13	8.2	-
3	51	13	7.4	-
4	66	13	7.4	-
5	80	13	7.8	-
6	96	13	8.3	-
7	110	13	10.9	-

Aus den Simulationsrechnungen kann der Schluss gezogen werden, daß die Ortung bis zu einem Verhältnis von Abstand zu Tiefe von 1:1 möglich ist, die Tiefenbestimmung ist dann allerdings fehlerhaft. Bei einem Verhältnis Abstand zu Tiefe von 2:1 kann die Tiefenbestimmung aus den Restfeldsignalen mit einem Fehler von ca. 0.5-1.2 cm vorgenommen werden. Dabei sind Messwerte mit einem Punktabstand von mindestens 1 cm als ausreichend anzusehen.

3.1.4 Aufbau der Magnetmessköpfe

Aufbauend auf den Arbeiten der Projektvorbereitungsphase und den seinerzeit gewonnenen Erkenntnissen der ersten Aufbauten [43], die als Magnetmesskopf Version 1 und Version 2 bezeichnet wurden, wurde für die magnetischen Messungen ein neuer Messkopf aufgebaut, der aus vier GMR Magnetometern (AA-002 von NVE, Inc.) besteht [43]. Zwei Magnetometer messen die Feldkomponenten H_x , die zwei anderen die Komponente H_z , jeweils an zwei wohldefinierten, leicht verschiedenen Tiefenpositionen z , wie in Bild 11 skizziert. Um eine hervorragende Linearität und Temperaturstabilität zu erreichen, werden die Magnetometer als Nulldetektoren in einem Konstantfeldmodus betrieben, in dem das gemessene Feld über Kompensationsspulen rückgekoppelt wird. Der magnetische Messkopf beinhaltet ferner einen starken Permanentmagneten zur Magnetisierung der Bügel, der in einem Abstand von ca. 30 cm von den Magnetometern montiert ist (Bild 12).



Bild 11. Skizze der Sensorpositionen im Magnet-Messkopf Version 3.

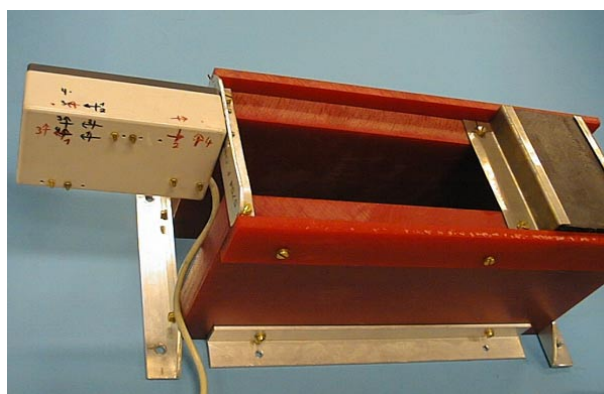


Bild 12. Magnet-Messkopf Version 3. Links ist das Gehäuse der Magnet-Sensoreinheit zu sehen, rechts der Permanentmagnet zur Magnetisierung der Bügel.

Im Laufe des Forschungsprojektes wurde eine verbesserte Version 4 der magnetischen Sensoreinheit realisiert, die sich gegenüber Version 3 durch eine verbesserte Elektronikplatine, robustere und präzisere mechanische Sensorhalterungen, zusätzliche individuelle Ausgänge der einzelnen

Sensorkanäle sowie kürzere Abstände zwischen den Sensoren auszeichnet. Bild 13 und Bild 14 zeigen diesen neuen Magnet-Messkopf Version 4.

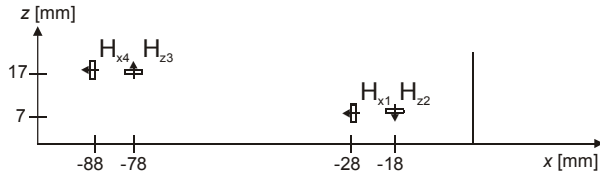


Bild 13. Skizze der Sensorpositionen im Magnet-Messkopf Version 4.



Bild 14. Magnet-Messkopf Version 4.

Der Magnet-Messkopf Version 4 wurde beim Aufbau des Radar-Magnet-Messwagens verwendet.

3.1.5 Magnetische Probemessungen im Labor

Unter Verwendung des magnetischen Messkopfs Version 3 wurden im Labor Messungen an einzelnen Stahlbügeln (Durchmesser 8 mm) in verschiedenen Abständen vom Messkopf durchgeführt. Bild 15 zeigt die gemessene Magnetfeldkomponente H_x als Funktion der Position x für verschiedene Abstände (Tiefen) z , Bild 16 die Magnetfeldkomponente H_z .

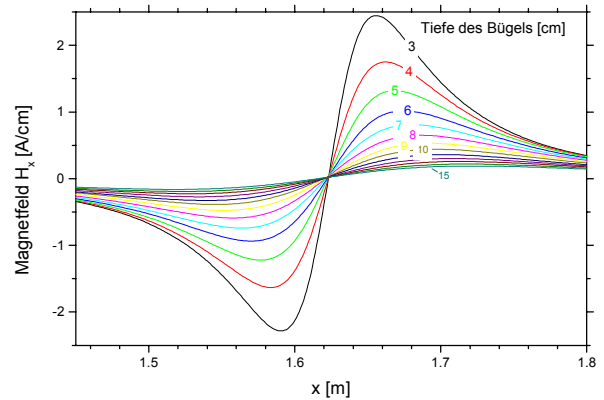


Bild 15. Gemessene Magnetfeldkomponente H_x als Funktion der Scankoordinate x für verschiedene Abstände (Tiefen) z beim Laborscan über einen Bügel bei $x = 1.623$ m.

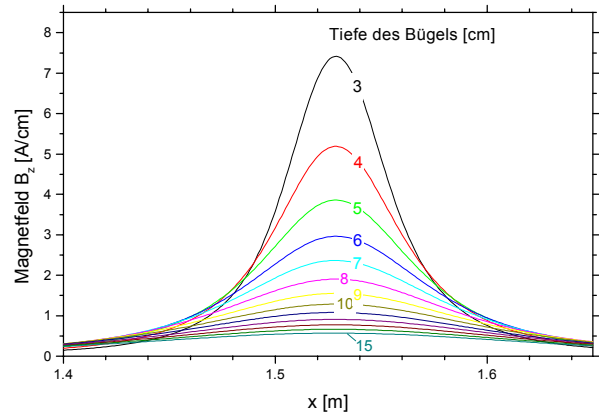


Bild 16. Gemessene Magnetfeldkomponente H_z als Funktion der Scankoordinate x für verschiedene Abstände (Tiefen) z beim Laborscan über einen Bügel bei $x = 1.524$ m.

Nach numerischer Differentiation (bzw. Differenzbildung $H_{z,z} = H_{z4} - H_{z3}$) wurde unter Verwendung der Beziehungen (14), (15) und (16) die Tiefe des Stahlbügels berechnet. Bild 17 zeigt das Ergebnis. Man erkennt, dass bei kleinen Abständen die Resultate aller drei Formeln den wirkliche Bügeltiefe gut wiedergeben.

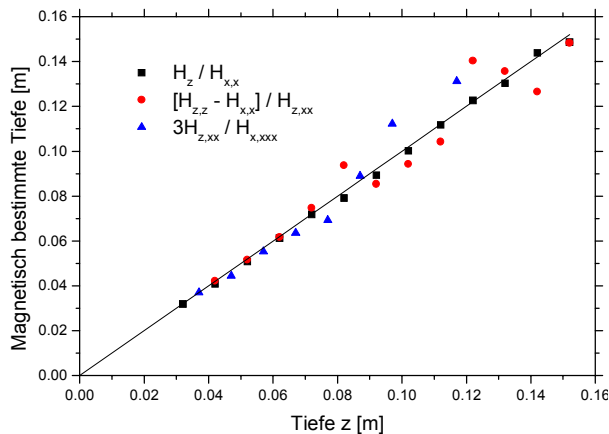


Bild 17. Vergleich von drei verschiedenen Berechnungsmethoden zur magnetischen Tiefenbestimmung, basierend auf Gradienten verschiedener Ordnungen.

Für größere Abstände ergeben sich vor allem bei den höheren Ableitungen bereits Abweichungen, die auf das Zusatzrauschen bei jeder zusätzlichen Differenzierungsordnung zurückzuführen ist. Daher könnte man nun zu der Annahme gelangen, dass es sinnvoll ist, eine Formel mit möglichst niedriger Ordnung zu verwenden, wie z.B. (14), die das z -Feld und das differenzierte x -Feld verwendet. Diese Annahme ist aber bei einer realen Situation am Bauwerk falsch. Im Gegensatz zur Laborsituation ist am Bauwerk das magnetische Offsetfeld unbekannt. Weiterhin haben die Signale benachbarter Bügel um so kleineren Einfluss, je höher die Ordnung der Differenzierung ist. Daher sollte man in der Praxis die höchste Differenzierungsordnung verwenden, die bei dem gegebenen Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Magnetfeldsensoren noch zuverlässig bestimmt werden kann, um die Störeffekte benachbarter Bügel und anderer Eisen so effizient wie möglich zu unterdrücken.

Zum Vergleich wurde außerdem eine Bewehrungsanordnung ähnlich zur Geometrie02 (Bügeltiefe ca. 13 cm) untersucht (Bild 18). Bild 19 zeigt die Ergebnisse der mit einem kommerziellen Bewehrungssucher (Hilti Ferroscan) durchgeführten Messung. Bild 20 stellt die magnetischen Restfeldmessungen dar, die mit dem großen Prüfkopf der MPA aufgezeichnet wurden.

Zur Bestimmung der Ableitungen wurde die Filterung mit folgenden Parametern vorgenommen: $k = 10$, $n = 20$ cm. Die Verläufe der Ableitungen sind in Bild 21 dargestellt.

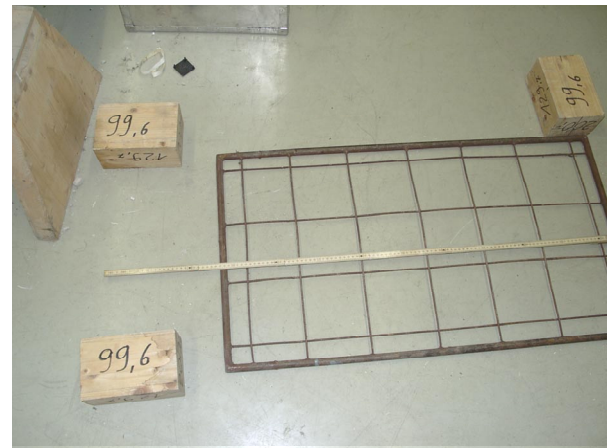


Bild 18. Untersuchte Bewehrungsmatte (Abstand zur Messebene $10 + 3$ cm = 13 cm).

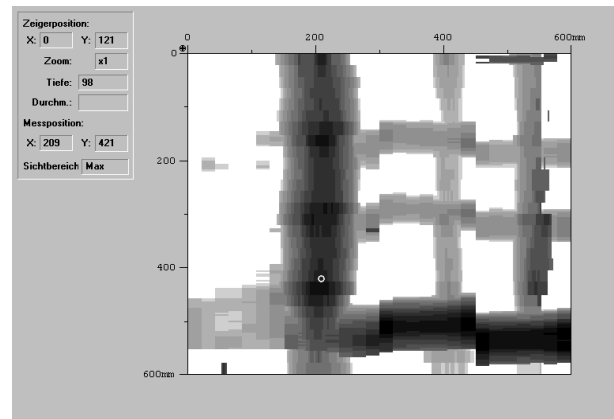


Bild 19. Auswertung mit Hilti Ferroscan. Die Tiefe am Punkt wird zu 9.8 cm angegeben (der Istwert beträgt 13.0 cm).

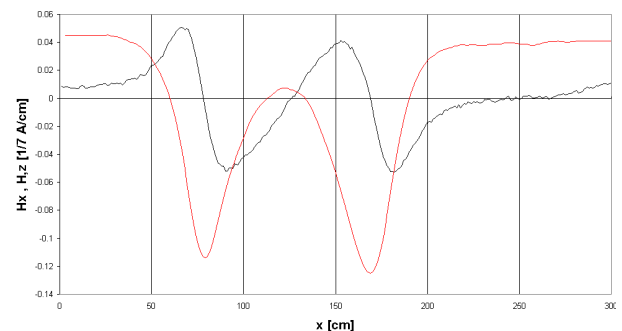


Bild 20. Restfeldverläufe H_x und H_z . Abstand der Messpunkte 1 cm.

Aus der z -Komponente kann die Ortung der Bügel vorgenommen werden. Die Tiefenbestimmung ist jedoch nur für die Randbügel ($x_B = 78$ und $x_B = 172$ cm) möglich. Die Auswertung nach Gl. (16) liefert bei einem Offset der Magnetfeldsensoren von ca. 2 cm folgendes Resultat (siehe Tab. 6).

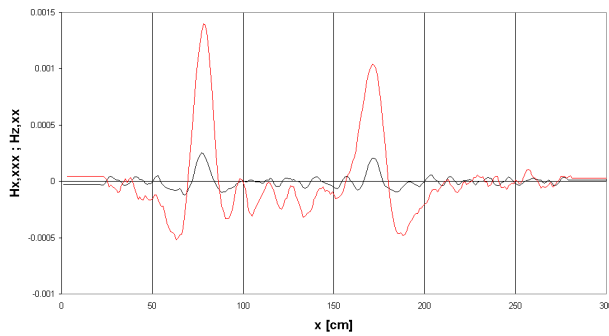


Bild 21. Berechnete Ableitungen der Restfeldmessungen.

Tab. 6. Ergebnis der Tiefenbestimmung nach Gl. (16) mit $dx = 1$ cm im Falle der Bewehrungsmatte.

x_B [cm]	z_B [cm] Istwert	z_B [cm] berechnet	z_B [cm] ohne Offset
78	13	17	15
172	13	15	13

Dieses Messbeispiel bestätigt die Nachweisgrenzen des Verfahrens, die zuvor in den Simulationsrechnungen erhalten wurden. Der Vergleich mit dem kommerziellen Hilti-Gerät zeigt, dass beide Verfahren ähnliche Ergebnisse liefern, die Durchführung der Restfeldmessungen ist jedoch versuchs-technisch mit einem geeigneten Prüfkopf wesentlich einfacher durchzuführen.

3.1.6 Fazit

Die Tiefenbestimmung von Querbügeln kann mit der Methode der magnetischen Restfeldmessung vorgenommen werden. Der Vorteil ist die relativ einfache messtechnische Durchführung. Bei Abstandstiefenverhältnissen von 2:1 ist die Genauigkeit der Tiefenbestimmung etwa 0,5 - 1 cm bei Betonüberdeckungen von 5 - 6 cm. Bei kleineren Verhältnissen (1,5 :1) nimmt die Genauigkeit der Tiefenbestimmung ab. Bei Verhältnissen von 1:1 ist die Ortung noch möglich, die Tiefenbestimmung ist aber nur noch in Ausnahmefällen möglich. Bei diesen Verhältnissen zeigen kommerzielle Geräte ein ähnliches Verhalten. Durch ein erweitertes numerisches Savitzky-Golay-Filter können die Ableitungen der Messwerte auch bei verrauschten Signalen noch vorgenommen werden. Allerdings sind die Filterparameter entsprechend dem Problem anzupassen. Zur Verifikation dieser Erkenntnisse unter Praxisbedingungen sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich.

3.2 Entwicklung des Radar-Messkopfs

3.2.1 Mathematische Betrachtung zur Bestimmung der komplexen Dielektrizitätszahl

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in homogenen, quellenfreien Medien wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (27)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (28)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (29)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (30)$$

Durch Bilden der Rotation von Gl. (27) und (28) und Einsetzen von (29) und (30) lassen sie sich zu folgenden zwei Gleichungen im Frequenzbereich umformen:

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} = i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)\mathbf{E} \quad (31)$$

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{H} = i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon)\mathbf{H} \quad (32)$$

Lösungen der Wellengleichungen (31) und (32) sind gedämpfte, ebene Wellen der Form

$$\mathbf{E}(z, \omega) = E_0 \exp(-\alpha z) \exp(-i\beta z) \quad (33)$$

(ebenso für \mathbf{H}) mit der Dämpfungskonstante α und der Phasenkonstante β . Die Dämpfungskonstante α lässt sich schreiben als

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]}, \quad (34)$$

die Phasenkonstante β als

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}, \quad (35)$$

Nehmen wir ein homogenes, dielektrisches, unmagnetisches Medium mit Verlusten an, die nicht zu groß sind, d.h. $\sigma \ll \omega\varepsilon$. Die Materialkonstanten seien $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ und $\mu = \mu_0$. Der Winkel

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_r} \quad (36)$$

wird als Verlustwinkel bezeichnet. Dann lassen sich die Dämpfungskonstante α und die Phasenkonstante β mit der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ wie folgt schreiben und entwickeln:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1 \right]} \approx \frac{\omega}{c} \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2} \tan \delta \quad (37)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1 \right]} \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r} \left(1 + \frac{1}{8} \tan^2 \delta \right) \quad (38)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Welle ist somit wie folgt entwickelbar:

$$v = \frac{\omega}{c} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(1 - \frac{1}{8} \tan^2 \delta \right) \quad (39)$$

Im Fall vernachlässigbarer Verluste wird daraus

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (40)$$

Der Transmissionskoeffizient beim senkrechten Übertritt einer ebenen elektromagnetischen Welle von einem Medium 1 in ein anderes Medium 2 ist gegeben durch

$$\tau = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \quad (41)$$

mit der intrinsischen Impedanz der Welle im jeweiligen Medium (Verhältnis der Phasenvektoren \mathbf{E} und \mathbf{H}) von

$$\eta = \frac{E_0 \exp(-\alpha z) \exp(-i\beta z)}{H_0 \exp(-\alpha z) \exp(-i\beta z)} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (42)$$

Um die Amplitudenschwächung der Radarmessung eines Bewehrungsstabes zu berechnen, betrachten wir den idealisierten Fall einer aus der Luft in das Medium m (Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, dielektrische Verluste $\tan \delta$) eindringenden ebenen Welle, ihre Reflexion an einem Metallobjekt, den Rücklauf durch das Medium und den Wiederaustritt in Luft (vgl. Bild 22).

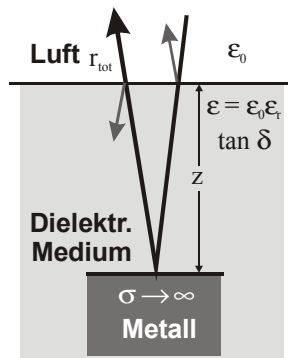


Bild 22. Veranschaulichung der Radar-Reflexion an einem Metallobjekt (Bewehrungsstahl), dass in ein dielektrisches Medium (Beton) eingebettet ist.

An der Metallfläche wird die Welle vollständig spiegelnd reflektiert ($r = -1$). Der Gesamtreflektions-

koeffizient r_{tot} setzt sich zusammen aus den beiden Transmissionskoeffizienten (Luft-Medium bzw. Medium-Luft) und der zweimaligen Dämpfung im Medium:

$$r_{tot} = \frac{2\eta_m}{\eta_m + \eta_0} \exp(-2\alpha z) \frac{2\eta_0}{\eta_m + \eta_0} \quad (43)$$

Einsetzen der Materialparameter liefert den Ausdruck

$$r_{tot} = \frac{\frac{4}{\sqrt{\epsilon_r}} (1 + \tan^2 \delta)^{-1/4}}{\left[\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} (1 + \tan^2 \delta)^{-1/4} + 1 \right]^2} \exp\left(-\frac{\omega z}{c} \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta\right) \quad (44)$$

der sich im Falle hinreichend kleiner Verluste vereinfachen lässt zu

$$r_{tot} = \frac{4}{\sqrt{\epsilon_r}} \exp\left(-\frac{\omega z}{c} \sqrt{\epsilon_r} \tan \delta\right) \quad (45)$$

Die komplexe Dielektrizitätszahl des Mediums lässt sich durch Inversion der Gl. (40) für die Wellengeschwindigkeit und der vereinfachten Gl. (45) für den Reflektionskoeffizient aus den Messgrößen Laufzeit t_r und Amplitude $A_r = r_{tot} A_0$ des Radarechos eines Stahlbügels in der Tiefe z ermitteln. Man erhält in erster Näherung

$$\sqrt{\epsilon_r} \approx \frac{c}{v} = \frac{ct_r}{2z} \quad (46)$$

und

$$\tan \delta = \frac{c}{\omega z \sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + 1 \right)^2 r_{tot}}{\frac{4}{\sqrt{\epsilon_r}}} \right] \quad (47)$$

Durch iteratives Einsetzen des so ermittelten Verlustwinkels $\tan \delta$ in die Gl. (39) für die Wellengeschwindigkeit und in Gl. (47) lässt sich die Genauigkeit sukzessive verbessern.

Im Falle einer Asphalt-Deckschicht über dem Beton erhält man mehrere Reflektionskomponenten der Radarwelle. Der erste Peak wird durch die Reflexion an der Grenzfläche Luft-Asphalt erzeugt. Der zweite Peak entsteht durch Reflexion an der Grenzfläche Asphalt-Beton und Wiederaustritt an die Luft. Der dritte, für unsere Messung relevante Peak kommt durch Reflexion am Stahlbügel zustande, vgl. Bild 23.

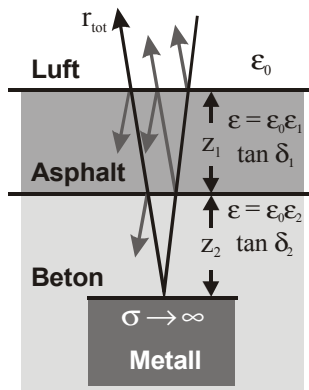


Bild 23. Veranschaulichung der Radar-Reflexion an einem Bewehrungsstahl, der in Beton (Materialparameter ϵ_2 , $\tan \delta_2$, Überdeckung z_2) eingebettet ist und von Asphalt (Materialparameter ϵ_1 , $\tan \delta_1$, Dicke z_1) überdeckt ist.

Den gesamten Reflektionskoeffizienten für diese Komponente erhält man durch Berücksichtigung der Streuverluste an den vier Grenzflächen und der Absorptionsverluste beim zweimaligen Durchtritt durch die beiden Medien Asphalt und Beton gemäß

$$r_{tot} = \frac{16}{\epsilon_1 \sqrt{\epsilon_2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} + 1 \right) \cdot \exp \left[-\frac{\omega z}{c} \left(\sqrt{\epsilon_1} \tan \delta_1 + \sqrt{\epsilon_2} \tan \delta_2 \right) \right] \quad (48)$$

Die Laufzeit der Welle berechnet sich additiv aus den Laufzeiten in den beiden Medien, unter Berücksichtigung der Korrektur für die Verluste in erster Ordnung erhält man

$$t_r = \frac{2z_1}{v_1} + \frac{2z_2}{v_2} \approx \frac{2}{c} \left[z_1 \sqrt{\epsilon_1} \left(1 + \frac{1}{8} \tan^2 \delta_1 \right) + z_2 \sqrt{\epsilon_2} \left(1 + \frac{1}{8} \tan^2 \delta_2 \right) \right] \quad (49)$$

Im Falle bekannter Dicke z_1 und bekannter Materialparameter ϵ_1 und $\tan \delta_1$ der Asphaltsschicht ist es möglich, die Gl. (48) und (49) nach der Dielektrizitätszahl ϵ_2 und dem Verlustwinkel $\tan \delta_2$ des Beton aufzulösen.

3.2.2 Durchführung von Radar-Messungen mit dem RAMAC-Georadar

Für die vorliegenden Messungen wurde das Geo-Radar-System RAMAC/GPR von MALÅ GeoScience [44] mit einer bistatischen 1 GHz-Sende-Empfangs-Antennen-Kombination verwendet. Bild 24 zeigt den Antennen-Messkopf des Bodenradar-Systems. Es wird mit Hilfe eines Handgriffes über den Boden gezogen. Dabei zeichnet ein Drehge-

ber-Rad die Ortskoordinate des Scans auf und löst ca. alle 10 mm eine Radar-Impulsmessung aus.



Bild 24. Die 1 GHz-Antenne des Geo-Radar-Systems RAMAC/GPR von MALÅ GeoScience.

Die gemessenen Radar-Reflexionssignale eines Linienscans werden von dem Gerät als B-Scan wiedergegeben, das einem Tiefenprofil entlang der Fahrt entspricht. zeigt exemplarisch einen Scan und stellt die Auswertung vor.

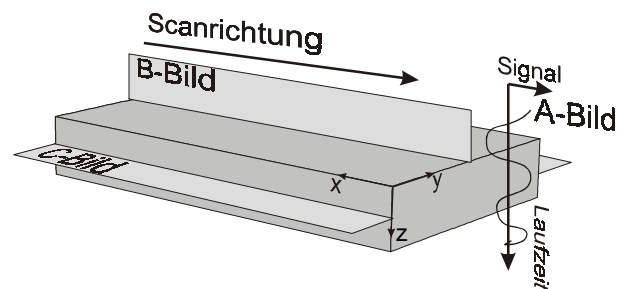


Bild 25. Veranschaulichung von A-Bild, B-Bild und C-Bild-Darstellung von Radar-Daten. Das A-Bild ist die Kurvendarstellung des aufgenommenen Radar-Reflexionssignals S als Funktion der Laufzeit bzw. der Tiefe z , d.h. $S(z)$ bei festem Ort x_0, y_0 . Mit B-Bild bezeichnet man die flächenhafte Farb- oder Graustufen-Darstellung vieler A-Bilder eines Scans, d.h. $S(x,z)$ bei festem y_0 . Das B-Bild entspricht damit einem Vertikalschnitt des zu untersuchenden Objektes. Das C-Bild ist die flächenhafte Darstellung aller Radar-Impulsechos fester Laufzeit, d.h. $S(x,y)$ bei festem z_0 . Damit entspricht das C-Bild einem Schnittbild in der Tiefe z_0 parallel zur Oberfläche.

Reflektierende Strukturen quer zur Scanrichtung, z.B. Armierungs-Stähle, Spannglieder, Dübel oder Anker im Beton, sind anhand ihrer charakteristischen Signalhyperbeln zu erkennen und zu orten [24,25,26], vgl. Bild 26.

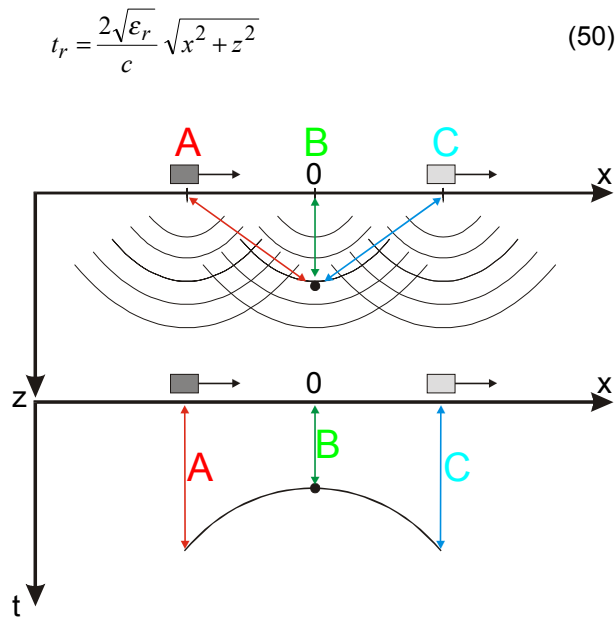


Bild 26. Veranschaulichung des Zustandekommens der charakteristischen Rückstreu-Hyperbeln quasi-punktförmiger Reflektoren im B-Scan des Bodenradars. Bei Annäherung des Radars an den Reflektor verkürzt sich die Laufzeit, sie ist minimal genau über dem Reflektor ($x = 0$) und verlängert sich mit wachsender Entfernung x vom Streuer.

3.2.3 Modifizierung der Auswerte-Software

Bild 16 zeigt die Benutzeroberfläche unseres selbst erstellten Visualisierungs- und Auswerteprogramms für Radarmessungen. Das aufgenommene Radargramm wird in B-Bild-Darstellung als Flächengraph dargestellt. Um die Verluste der Streuintensität mit der Materialtiefe auszugleichen, kann eine Verstärkung der Response-Signale zu späten Response-Zeiten aktiviert werden. Ab einer frei wählbaren Zeile j_0 wird das Signal um einen zeilenabhängigen Verstärkungsfaktor A_j

$$A_j = 1 + (j - j_0)\alpha \quad (51)$$

verstärkt.

Das tiefenabhängig verstärkte Radargramm wird ebenfalls als Flächengraph dargestellt. Der Benutzer kann mit einem Cursor sowohl eine Zeile als auch eine Spalte des Radargramms markieren, die als C-Bild-Zeile bzw. A-Bild auf dem Bildschirm dargestellt werden.

Zur Bestimmung der genauen Scheitelpunkte der Hyperbeln wurde eine automatisierte Auswertung von Radargrammen implementiert. Die Laufzeit der an oberflächennaher Bewehrung gestreuten Radarwelle wird beeinflusst von den einstellbaren Parametern Dielektrizitätskonstante ε des Mediums sowie dem z-Offset (Antennen-Zentrum).

Die Positionen der Extrema der A-Scans der Radargramme wurden mittels Parabelfit an n Stützstellen ermittelt. In unserem Falle äquidistanter Stützstellen x_i (d.h. $x_i - x_{i-1} = \Delta x$) und Messwerten

y_i . O.B.d.A. wird $x_i = \left(i - \frac{n+1}{2}\right)\Delta x$ angenommen.

Der Parabel-Ansatz lautet

$$p(x) = ax^2 + bx + c. \quad (52)$$

Die Parameter a , b , und c werden als Lösung des überbestimmten linearen Gleichungssystems durch die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt:

$$\left\| \mathbf{A} \begin{pmatrix} c \\ b \\ a \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \right\| = \text{Min.} \quad (53)$$

Die Matrix \mathbf{A} ist dabei definiert als

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{pmatrix}. \quad (54)$$

Der Lösungsvektor berechnet sich gemäß

$$\begin{pmatrix} c \\ b \\ a \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}. \quad \text{Die Inverse } \mathbf{A}^T \mathbf{A} \text{ lässt sich}$$

schreiben als:

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} &= \begin{pmatrix} s_0 & 0 & s_2 \\ 0 & s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & s_4 \end{pmatrix}^{-1} = \\ &= \frac{1}{s_2^2 - s_0 s_4} \begin{pmatrix} -s_4 & 0 & s_2 \\ 0 & s_2 - s_0 s_4 / s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & -s_0 \end{pmatrix} \\ \text{mit } s_0 &= n, \quad s_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 = \Delta x^2 \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \\ \text{und } s_4 &= \sum_{i=1}^n x_i^4 = \Delta x^4 \frac{n(n+1)(2n+1)(3n^2+3n-1)}{30} \end{aligned} \quad (55)$$

Damit ergibt sich die Lösung für die Parabelkoeffizienten gemäß

$$\begin{pmatrix} c \\ b \\ a \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{s_2 t_2 - s_4 t_0}{s_2^2 - s_4 t_0} \\ \frac{t_1}{s_2} \\ \frac{s_2 t_0 - s_0 t_2}{s_2^2 - s_4 t_0} \end{pmatrix}$$

mit den Konstanten

$$t_j = \sum_{i=1}^n x_i^j y_i \quad (56)$$

Der Scheitel der Parabel liegt bei

$$y_0 = c - \frac{b^2}{4a} \quad (57)$$

Für jeden Radar-A-Scan werden die Extrema mittels Parabelfits gemäß den Gleichungen (9) und (10) bestimmt. Die Differenz der Extrema der Oberflächenreflexion (in unserem Fall das erste Minimum) und der Reflexion am Bewehrungsbügel liefert dann die Tiefe der Bewehrung. Dabei erfolgt die Umrechnung zwischen Sample-Pixeln und Tiefe mittels der DK gemäß

$$z[m] = \text{Laufzeit[Pixel]} \cdot \Delta t \cdot \frac{c}{2\sqrt{\epsilon}}$$

$$\text{mit } \Delta t = \frac{1}{30798.7 \text{ MHz}} \text{ und } c = 2.9979 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (58)$$

Die Dielektrizitätszahl bei gegebener Betondicke (oder umgekehrt die Tiefe bei gegebener DK) wird im Auswerteprogramm für den mittels Vertikal-Cursor ausgewählten A-Scan angezeigt.

Die Umrechnung der Radargramm-Horizontalskala in die Scankoordinate x ergibt sich aus

$$x [m] = 0.009379 [m/Pixel] \times \text{Horizontalkoordinate [Pixel]} + x_0 [m] \quad (59)$$

mit der Startkoordinate x_0 des Scans.

Die der Laufzeit entsprechende Tiefenkoordinate berechnet sich gemäß

$$t [\text{ns}] = 0.03247 [\text{ns/Pixel}] \times (\text{Vertikalkoordinate [Pixel]} - \text{Offset [Pixel]}) \quad (60)$$

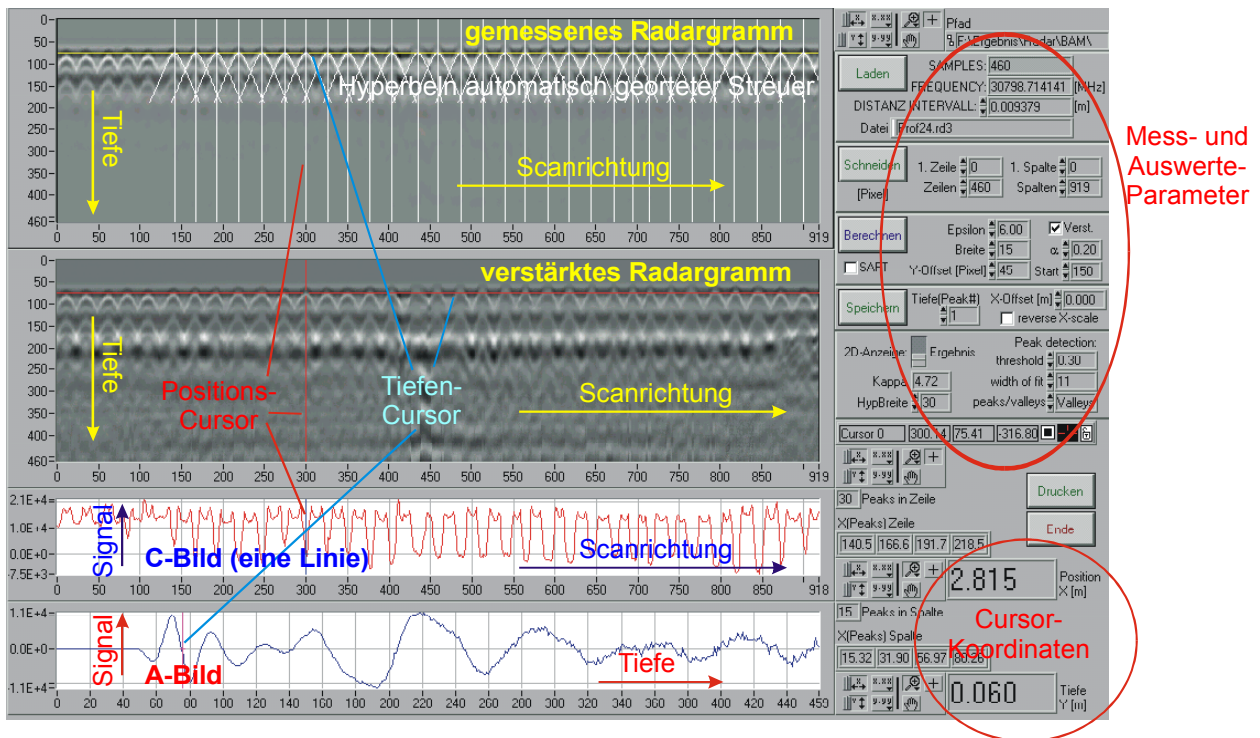


Bild 27. Benutzeroberfläche des Auswert-Programms für Radar-Messungen. Der obere Flächengraph zeigt das aufgenommene Radargramm in B-Bild-Darstellung. Die von der automatischen Hyperbel-Erkennung gefundenen Streu-Hyperbeln sind zur Kontrolle weiss eingezeichnet. Der untere Flächengraph stellt das tiefenabhängig verstärkte Radargramm dar. Der obere, rote x-y-Graph zeigt die durch den Cursor markierte Zeile des verstärkten Radargramms (als Funktion der Scankoordinate in Pixeln). Der rote Graph entspricht damit einer Linie des C-Bildes. Der unterste blaue x-y-Graph stellt die durch den Cursor markierte Spalte des Radargramms dar, d.h. das A-Bild an der in den drei oberen Graphen markierten Positions-Cursor-Position. Die Koordinaten-Achsen aller Graphen sind in Pixeln angegeben. Die Umrechnung von Pixeln in Meter erfolgt durch das vom Drehgeber des Positionsgabers abgeleitete „Distanz-Intervall“, bei unseren Messungen stets 9.379 mm.

3.3 Entwicklung und Aufbau des Radar-Magnet-Messwagens

Nach Abschluss der Verfahrensentwicklung und der ersten Testmessungen im Labor wurden die magnetischen Messkomponenten und das Geo-Radar-System auf einem selbstgebauten Handwagen zusammengeführt. Bild 17 zeigt den schematischen Aufbau dieses Radar-Magnet-Messwagens. Dieser Messwagen wird von Hand über die zu messende Fahrbahn geschoben. Am Bug des Wagens wird ein Permanentmagnet (150 mm × 100 mm × 27 mm) zur Aufmagnetisierung der Bewehrungsbügel über die Fahrbahnoberfläche geführt. Dann erfolgt die Impulsradarmessung und am Heck des Wagens schließlich die Magnetfeldmessung der Längskomponente x und der Vertikalkomponente z in zwei verschiedenen Höhen (3 bzw. 4 cm über der Fahrbahnoberfläche).

Bild 29 zeigt schematisch die elektrische Verdrahtung auf dem Radar-Magnet-Messwagen. Das Magnetometer-Modul liefert die Ausgangssignale der vier Sensoren als Spannungen im Bereich ± 10 V. Diese Spannungen werden über BNC-Verbindungen dem A/D-Modul DT9804 von Data Translation zugeführt. Der Drehgeber (Hengstler RI32, 1024 Pulse / Umdrehung) wird einerseits über digitale Eingänge des USB-Datenaufnahmемoduls gelesen, andererseits mit einem skalierbaren Zählermodul (Hengstler tico 734) als Weganzeige in Metern dargestellt und drittens dem RAMAC/GPR Impulsradarcontroller zur Triggerung zugeführt. Das Datenaufnahmемodul ist über USB an einen Laptop-Computer angeschlossen, das Radargerät über eine LPT-Parallelverbindung mit einem zweiten Computer verbunden. Dies ist erforderlich, weil das Steuerprogramm des RAMAC/GPR von Malå Geoscience nur in einem DOS-Anwendungsfenster unter dem Betriebssystem Windows 98SE funktioniert, die

Treiber zum Auslesen des USB-Datenaufnahmемoduls hingegen nur unter Windows XP laufen. Beide Rechner sind über ein gekreuztes Netzwerkkabel zu einem Mini-LAN zusammengeschaltet.

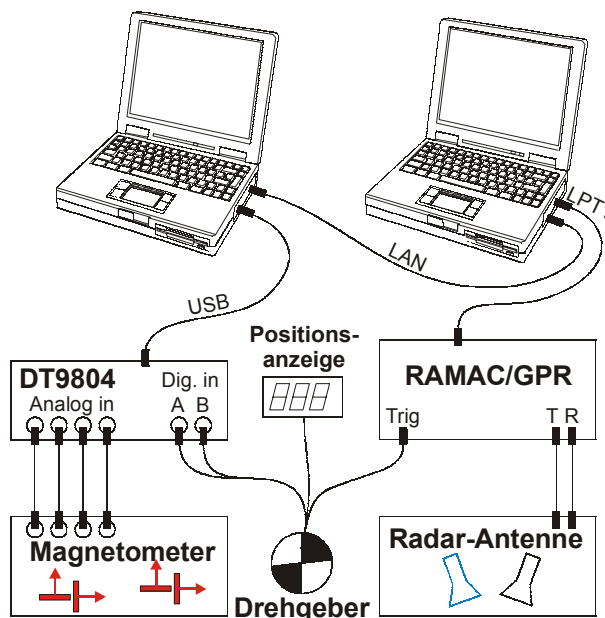


Bild 29. Verdrahtungs-Schema der Komponenten des Radar-Magnet-Messwagens. Auf die Darstellung der Akku-Stromversorgung wurde verzichtet.

Der Rahmen des Radar-Magnet-Wagens wurde aus 30 mm × 30 mm Bosch-Profilen zusammengeschraubt, siehe Bild 30. Die Walzenlager der Luftreifen laufen auf zwei starren Achsen. Auf einer Radnabe ist ein Zahnrad aufgeflanscht, das über einen Zahnriemen den Drehgeber mit 1:3-Übersetzung treibt.

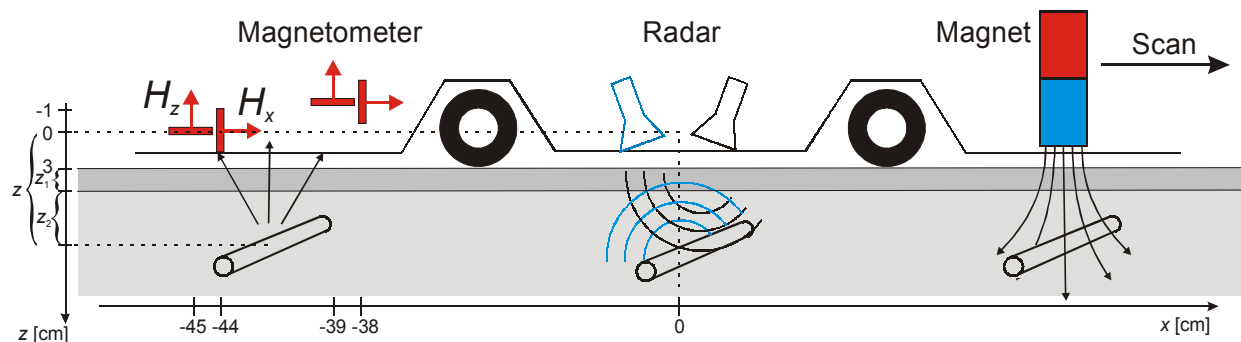


Bild 28. Skizze des Radar-Magnet-Messwagens. Im vorderen Bereich ist der Permanentmagnet mit ca. 2 cm Abstand zum Boden befestigt. Der Radar-Antennen-Kopf befindet sich in der Mitte des Wagens. Die Wegkoordinate wird über die Radarmessung festgelegt. Im hinteren Bereich befinden sich die vier Magnetometer-Sensoren. Die Ortskoordinaten der Magnetmessungen werden auf die Position des Radars korrigiert. Als Ursprung der Tiefenachse z wird die Koordinate der hintersten Magnetfeldsensoren gewählt. Sie liegt etwa 3 cm über dem Boden.



Bild 30. Der Radar-Magnet-Messwagen. Man erkennt den Permanentmagneten hinter dem rechten (Vorder-)Reifen, den riemengetriebenen Drehgeber und dahinter den Radar-Messkopf sowie den Magnet-Messkopf hinter dem Hinterreifen. Auf der Plattform darüber befindet sich die Radar-Elektronik (rechts), das USB-Datenaufnahmemodul (Mitte) sowie die Akkumulator-Stromversorgungseinheit (links). Auf der hier nicht abgebildeten oberen Plattform werden die beiden Laptop-Computer für die Radar-Datenaufnahme und für die magnetische Messung platziert, vgl. Bild 86.

Bei Tests auf dem Gelände und bei den Messungen auf den beiden Brückenbauwerken (Kapitel 6) wurde verifiziert, dass alle Komponenten des Radar-Magnet-Wagens zuverlässig funktionieren. Der Drehgeber wurde kalibriert, er liefert alle 0.063 mm einen Puls. Es wurde verifiziert, dass der Schlupf des mit dem Drehgeber verbundenen Rades und damit der Fehler der Ortsbestimmung vernachlässigbar gering ist (typisch < 3 cm auf 10 m). Die Magnetmessung erfolgt zeitgesteuert, z.B. mit 1 kHz. Per Software werden die Daten nach der Messung auf äquidistante Daten umgerechnet. Dazu wird für jeden Zieldatenpunkt eine Ausgleichsparabel über mehrere Intervalle mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, vgl. Bild 31. Wegen der verhältnismäßig langen Zeit für die Aufnahme und Übertragung einer Impulsradarmessung wird diese nur alle 9.4 mm ausgelöst. Der Scan über die Brückenfahrbahn kann mit diesen Einstellungen mit einer bequemen Geschwindigkeit von ca. 3 km/h erfolgen, ohne dass es zu Datenverlusten kommt.

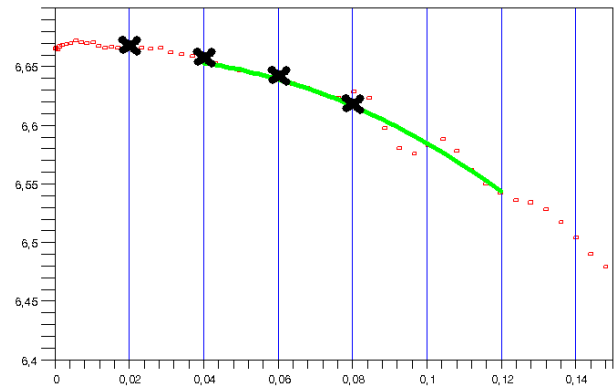


Bild 31. Schema der Datenglättung mittels Ausgleichsparabel.

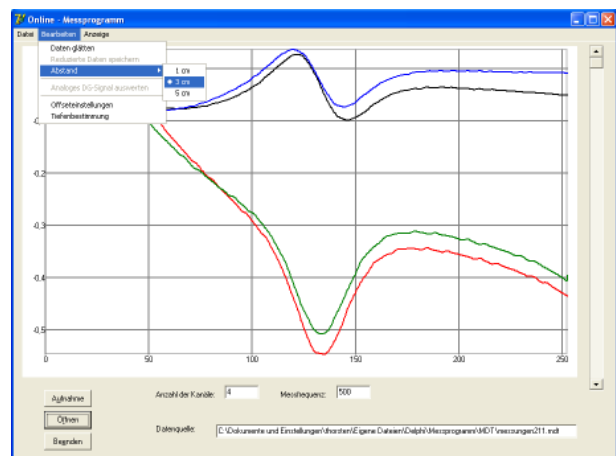


Bild 32. Bedieneroberfläche des Mess- und Auswerteprogramms für die magnetischen Messungen mit dem Radar-Magnet-Wagen.

Zur Datenaufnahme, Filterung und zur Berechnung der partiellen Ableitungen der Magnetfeldkomponenten und der Tiefe der Bewehrungsbügel wurde eine Mess- und Auswertesoftware in der Programmiersprache Borland Delphi 7 geschrieben, vgl. Bild 32. Das Programm ermöglicht einerseits eine Einstellung der wichtigsten Parameter der Messung unter Baustellenbedingungen auf dem Bauwerk, andererseits die Einstellung der Filterparameter, der Darstellungsoptionen und der Selektionseigenschaften für die automatische Peakdetektion zur Bestimmung der Bügeltiefe.

4 Entwicklung eines dielektrischen Hochgüte-Resonators für die Feuchte- und Salzmessung

Eine bekannte und erprobte Methode zur zerstörungsfreien Ermittlung des Feuchte- und Salzgehaltes von Baustoffen beruht auf der Bestimmung und Auswertung ihrer komplexen Dielektrizitätszahl im Mikrowellen-Frequenzbereich von 1 bis 10 GHz. Besteht nur einseitiger Zugang zum Baustoff und sollen Bohrlöcher vermieden werden, ist die Reflektometrie im Zeitbereich (TDR) bei 2.45 GHz gebräuchlich. Mikrowellen-Resonatoren werden bevorzugt verwendet, wenn das zu testende Material in den Resonator eingebracht werden kann. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen und um insbesondere die Effekte von Feuchte- und Salzgehalt zu trennen, benötigt man eine hohe Güte der Resonanz. Die Realisierung von offenen Mikrowellen-Resonatoren hoher Güte, die auf die zu prüfende Baustoff-Oberfläche aufgesetzt werden können, ist aufgrund der damit verbundenen Gütebelastung durch Abstrahlung problematisch.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zusätzlich ein alternatives Verfahren zur zerstörungsfreien Feuchte- und Salzgehaltsbestimmung entwickelt, das auf der Beobachtung der Verstimmung und Dämpfung eines Hochgüte-Mikrowellen-Resonators beruht. Die Entwicklungsarbeiten, die vergleichenden Simulationsrechnungen nach der Finite-Differenzen-Methode und die durchgeführten Messungen an Kalksandsteinen mit variabler Feuchte und Salzgehalt werden im folgenden vorgestellt.

4.1 Halboffener Resonator

4.1.1 Aufbau des Resonators

Zur Erzielung sehr hoher Güten, z.B. für schmalbandige Filter in der Mobilfunk- und Satellitenkommunikationstechnik, sind dielektrische Resonatoren gebräuchlich. Dielektrische Resonatoren auf der Basis verlustarmer Mikrowellenkeramiken mit hoher relativer Dielektrizitätszahl ϵ_r weisen auch bei teilweise offenen Geometrien hohe Güten auf. Unter Verwendung der Mikrowellenkeramik BZT (Barium-Zirkonium-Titanat) mit $\epsilon_r = 28$ wurde ein zylindrischer dielektrischer Mikrowellen-Resonator für die Feuchte- und Salzgehaltmessung von Baustoffen entwickelt, der in einem halboffenen Metallgehäuse angeordnet ist. (vgl. Bild 33). Die zylindrische Spezialkeramik für Mikrowellen (Radius $a = 15$ mm, Höhe $H = 21$ mm, Bohrung 4 mm) sitzt auf einem Teflonhalter, der in einen halboffenen Aluminiumzylinder (Innendurchmesser 80 mm, Höhe 54 mm) eingeschraubt ist. Der Resonator ist mit einem Deckel aus 1 mm Teflonfolie abgedeckt. Links befindet sich die koaxiale Einkoppelleitung mit einer ca. 3 mm großen Einkoppelschleife (Flächennormale in z-Richtung), rechts eine gleich große und gleich orientierte Schleife zur Auskopplung.

Aluminiumzylinder (Außen- \varnothing 100 mm, Innen- \varnothing 80 mm, Höhe 54 mm) eingeschraubt ist. Der Resonator wird mit einem Deckel aus 1 mm Teflonfolie abgedeckt. Beidseitig zur Resonatorkeramik befinden sich koaxiale Ein- und Auskoppelleitungen mit je einer ca. 3 mm großen Einkoppelschleife mit der Flächennormalen in axialer Richtung.

Die Resonanzfrequenz der TE_{018} -Mode des Keramikzylinders kann näherungsweise mit der Formel

$$f_0 [\text{GHz}] = \frac{34}{a [\text{mm}] \sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{a}{H} + 3.45 \right) \quad (61)$$

ermittelt werden [45]. Mit den oben angegebenen Parametern folgt $f_0 = 1.78$ GHz.

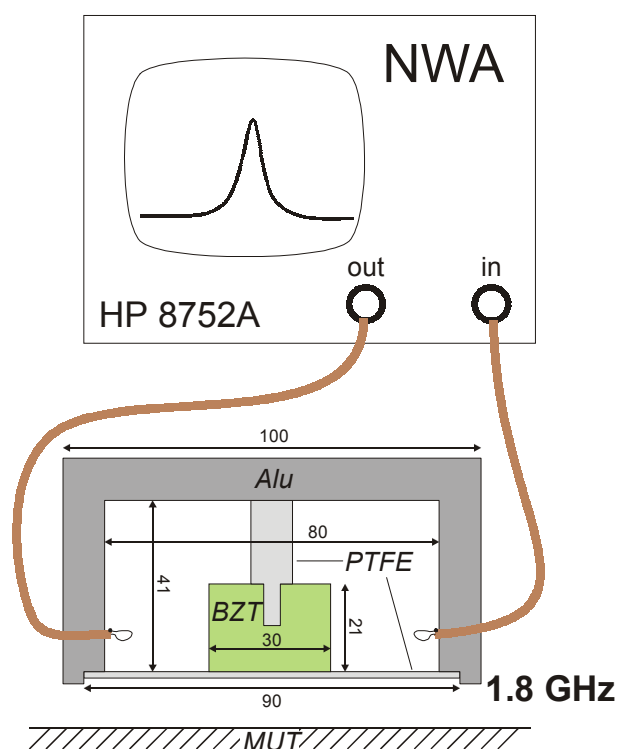


Bild 33. Skizze des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators. Die zylindrische BZT-Spezialkeramik (DK von $\epsilon = 28$, Durchmesser 30 mm, Höhe 21 mm Bohrung 4 mm) sitzt auf einem Halter aus Teflon (PTFE), der in einen halboffenen Aluminiumzylinder (Innendurchmesser 80 mm, Höhe 54 mm) eingeschraubt ist. Der Resonator ist mit einem Deckel aus 1 mm Teflonfolie abgedeckt. Links befindet sich die koaxiale Einkoppelleitung mit einer ca. 3 mm großen Einkoppelschleife (Flächennormale in z-Richtung), rechts eine gleich große und gleich orientierte Schleife zur Auskopplung.

Der Resonator wird an einen Netzwerkanalysator (Hewlett-Packard HP 8752A) angeschlossen. Die frequenzabhängige Transmission wird mit einer HF-Ausgangsleistung von 0 dBm gemessen. Zur Durchführung der Messung wird der Resonator einfach gegen die Oberfläche des zu messenden Materials (MUT - Material under test) gedrückt. Bild 34 zeigt den Resonator ohne Teflon-Deckel.

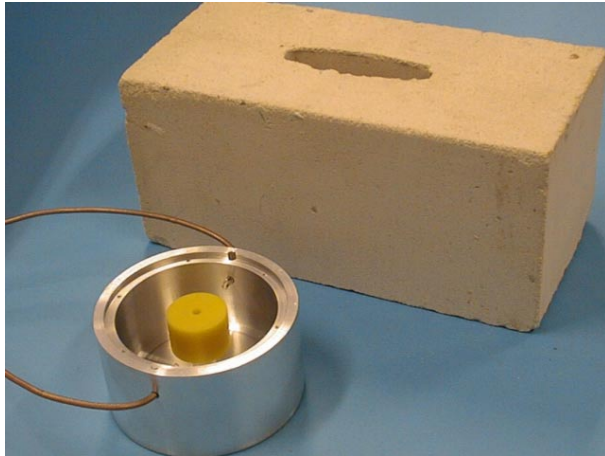


Bild 34. Foto des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators (ohne Teflon-Abdeckung).

4.1.2 Finite-Elemente-Simulation

Mit dem Finite-Differenzen-Programm Microwave Studio von CST wurde das System Resonator-Baustoff rechnerisch modelliert, die unter Ansatz verschiedener komplexer Dielektrizitätszahlen für den Baustoff durchgeführt wurden. In den Berechnungen ließ sich das Resonanzverhalten quantitativ präzise nachvollziehen.

Der Baustoff wurde als Zylinder mit Durchmesser 110 mm – 120 mm, Höhe 46 mm – 56 mm mit variablem Real- und Imaginärteil der DK simuliert. Für die Grenzen des simulierten Bereichs wurden freie Randbedingungen das elektromagnetische Feld angenommen. Das Aluminium wurde als Perfectly Electrically Conducting (PEC) angesetzt. Das Diskretisierungsgitter wies 15000 – 20000 Knoten auf. Es wurde für jeden Parameteransatz der Material-DK eine Bestimmung der Eigenfrequenzen mit dem Eigenmode Solver durchgeführt und anschließend die $TE_{01\delta}$ -Mode herausgesucht. Damit liegen die Frequenz und die E- und H-Felder fest.

Bild 35 zeigt das berechnete elektrische Feld im Resonator und im Baustoff. Bild 36 zeigt eine farbodierte Schnittdarstellung der Komponente des E-Feldes senkrecht zur Bildebene. Man erkennt, dass das elektrische Feld bis zu ca. 4 cm tief in den Baustoff eindringt. Das berechnete Magnetfeld H ist in Bild 37 dargestellt. Bild 38 zeigt die berechnete Resonanzfrequenz als Funktion des Realteils der Dielektrizitätszahl des Baustoffs. Man erkennt eine monoton verlaufende Reduktion der Frequenz mit steigender Materialfeuchte.

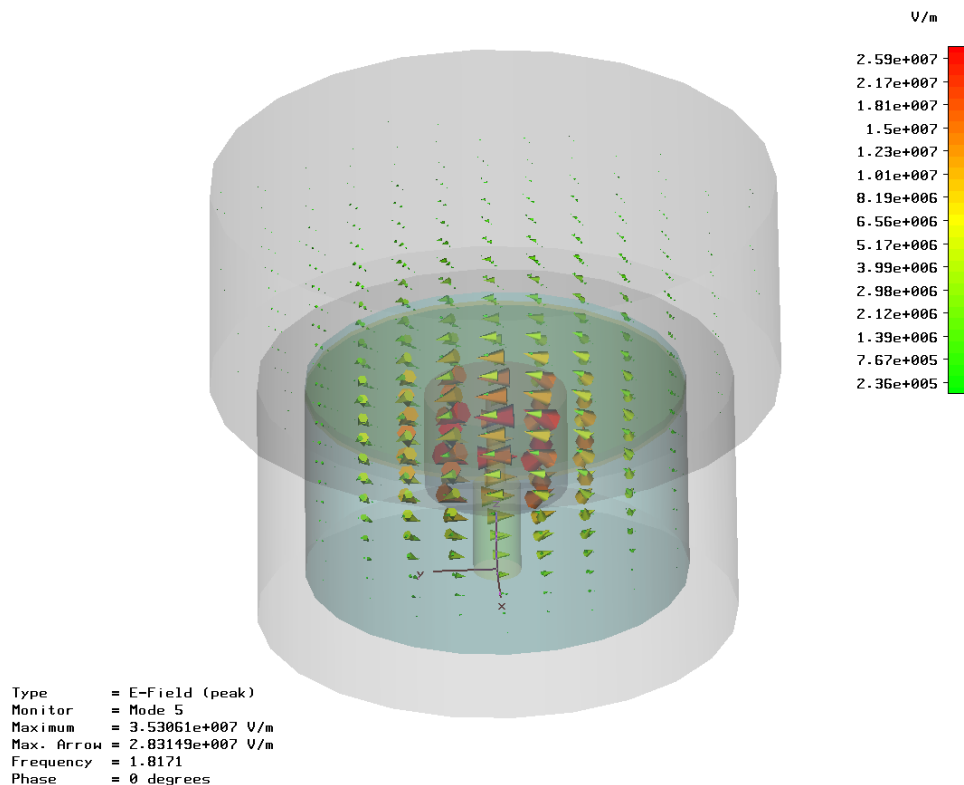


Bild 35. Vektordarstellung des simulierten elektrischen Feldes der $TE_{01\delta}$ -Mode des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators.

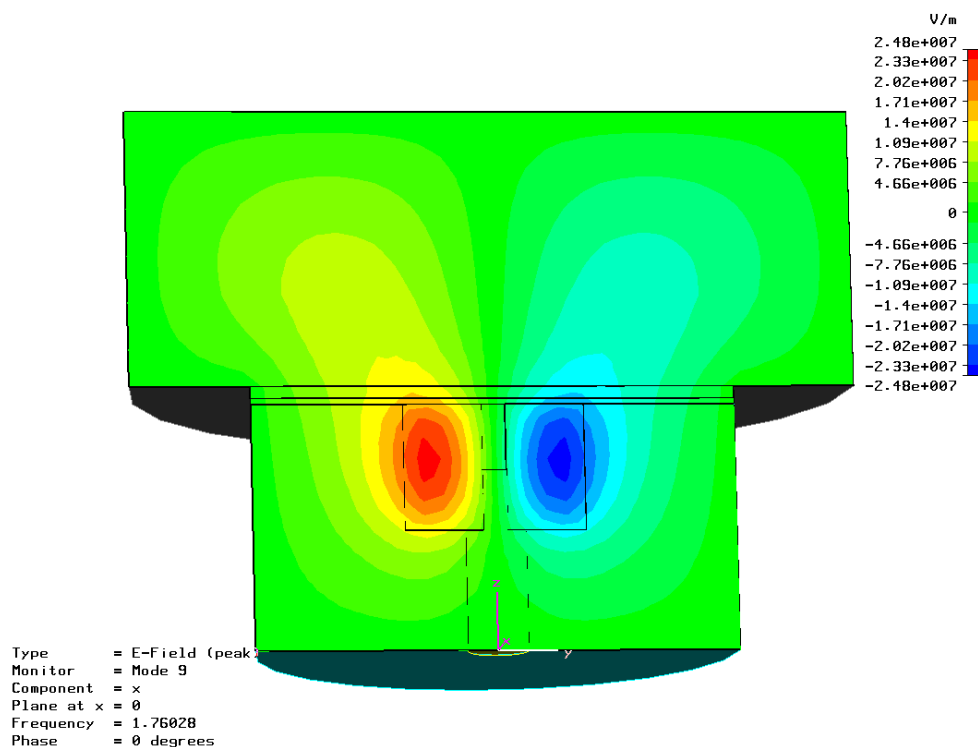


Bild 36. x-Komponente des simulierten elektrischen Feld der $TE_{01\delta}$ -Mode des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators in der y-Ebene.

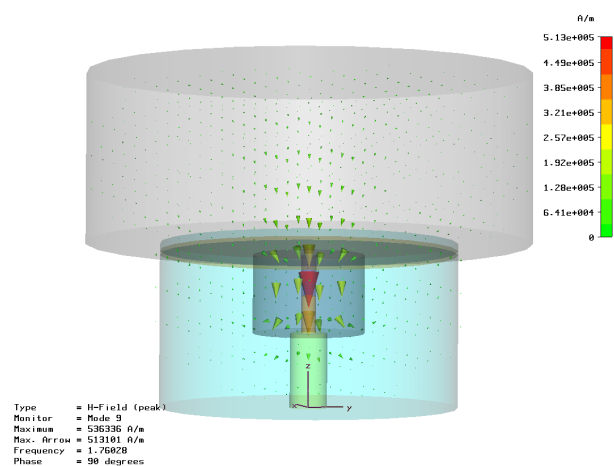


Bild 37. Vektordarstellung des simulierten magnetischen Feldes der $TE_{01\delta}$ -Mode des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators.

Mit dem Störungsrechnungs-Solver wurden dann die Verluste durch Ansatz realistischer Aluminium-Leitfähigkeit und unter Berücksichtigung des Verlustwinkels $\tan \delta$ des Baustoffs berechnet (Bild 39). Zur Bestimmung der effektiven DK von Systemen, die aus einem Gemisch von mehreren Phasen bestehen (im Falle feuchter poröser Baustoffe etwa die drei Phasen trockener Baustoff, Wasser und Luft), sind zahlreiche Mischungsmodelle entwickelt

worden [34]. Laut Schlemm [35] eignet sich das Complex Refractive Index (CRI)-Modell, bei dem der komplexe Brechungsindex $\sqrt{\epsilon'}$ gemäß dem Volumen-Verhältnis der Brechungsindizes der Konstituenten skaliert, besonders gut zur Beschreibung von verschiedenen porösen Baustoffen, insbesondere Sandsteine, Kalksandsteine und Ziegel. Für die Simulation wurden daher die Verluste im Baustoff gemäß Gl. (5) angesetzt.

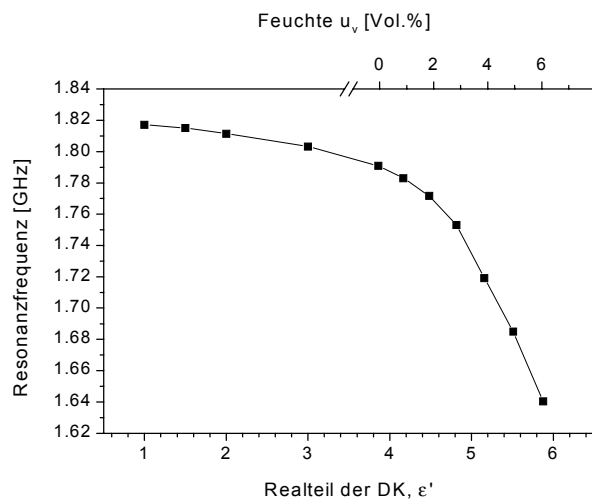


Bild 38. Simulierte Resonanzfrequenz $TE_{01\delta}$ -Mode des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators als Funktion des

Realteils der DK. Der zur DK korrespondierende Feuchtewert nach Schlemm [35] ist in der oberen x-Achse angegeben.

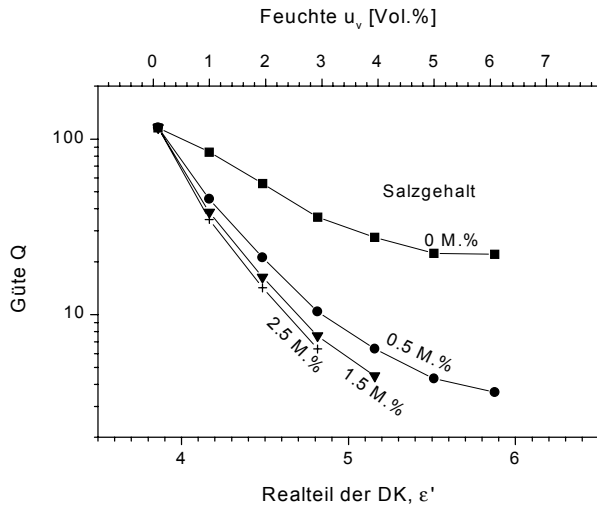


Bild 39. Simulierte Güte der Resonanz der $TE_{01\delta}$ -Mode des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators als Funktion des Realteils der DK. Der zur DK korrespondierende Feuchtewert nach Schlemm [35] ist in der oberen x-Achse angegeben. Die Güten sind ferner für verschiedene Salzgehalte (entsprechend der nach Schlemm [35] berechneten Imaginärteile der DK) angegeben.

4.1.3 Messungen an Kalksandsteinen

Der Resonator wurde mit den beiden coaxialen Koppelleitungen an den Reflexions- und Transmissions-Port eines vektoriiellen Netzwerkanalysators (Hewlett Packard 8752A) angeschlossen. Die Transmission wurde im Bereich der Resonanzfrequenz (1763.97 MHz im Falle des Resonators in Luft, ohne Baustoff) gemessen. Mit den Marker-Funktionen wurde automatisiert die Zentralfrequenz der Resonanz, die -3 dB-Güte Q sowie die Einfügedämpfung in der Resonanz aufgenommen (Bild 40 und Bild 41).

Als Referenz-Baustoff wurde ein Standard-Kalksandstein (240 mm \times 114 mm \times 113 mm) verwendet. Er wurde in einem Exsiccator mit einer Drehschieberpumpe über 3 Tage evakuiert und anschließend mit Leitungswasser geflutet. Über die Gewichtsänderung wurde die Rohdichte des leerpumpten Steins (1.889 g/cm³) und die max. Wasseraufnahme von 25.5 Vol.% bestimmt. Dann wurde der Stein über einen Zeitraum von 45 Tagen regelmäßig gewogen, die verbliebene prozentuale Feuchte berechnet, und anschließend durch Aufsetzen des Resonators auf die Mitte einer glatten Fläche des Steins die Resonanzfrequenz, Güte und Verlust gemessen. Da der Stein die Resonanz zu stark dämpfte, wurde stets eine 14 mm starke

Styroporplatte als Spacer zwischen Resonator und Baustoff verwendet.

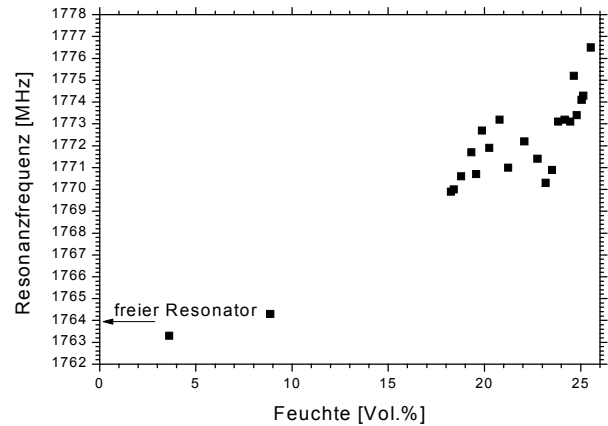


Bild 40. Gemessene Resonanzfrequenz des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators als Funktion der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins.

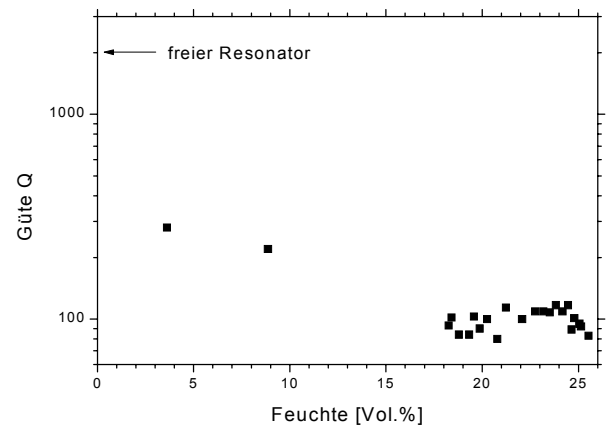


Bild 41. Gemessene Güte der Resonanz des halboffenen dielektrischen Hochgüte-Resonators als Funktion der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins.

4.1.4 Fazit

Die $TE_{01\delta}$ -Resonanz bei 1.8 GHz mit azimuthal umlaufendem E-Feld und axialem dipolaren H-Feld erwies sich als stabil. Ohne Baustoff wurde eine -3 dB-Güte von ca. 2000 gemessen. Bringt man den Resonator bis auf etwa 1 cm an einen Baustoff mit ebener Oberfläche heran, dann verändert sich durch die ca. 4 cm in den Baustoff eindringenden evaneszenten elektromagnetischen Felder der $TE_{01\delta}$ -Mode („fringe fields“) die Resonanz durch gleichzeitige Güte- und Transmissionsreduktion, ohne dass nennenswerte Abstrahlungsverluste auftreten.

Der halboffene Resonator hat den Vorteil, dass die Eindringtiefe mit ca. 40 mm vergleichsweise groß ist. Ferner ist es möglich, einen sehr großen Feuchtebereich zu messen, dabei erhöht sich die Resonanzfrequenz monoton mit der Feuchte.

Folgende Nachteile sind allerdings festgestellt worden: der Baustoff kann nicht direkt auf den Resonator aufgesetzt werden, denn in diesem Fall wird der Resonator zu stark gedämpft, so dass keine Resonanz mehr messbar ist. Daher ist ein Abstand von mindestens 10 mm zum Baustoff erforderlich. Außerdem streuen die Messwerte der Güte und der Dämpfung relativ stark. Das mindert die Genauigkeit der Feuchte- und Salzbestimmung.

4.2 Resonator mit Lochblende

4.2.1 Aufbau des Resonators

Der halboffene zylindrische Alugehäuse des Resonators wurde zusätzlich mit einer Aluminium-Deckelblende (Außen-Durchmesser 90 mm, Innendurchmesser 50 mm) abgedeckt, um die Güte des Resonators zu erhöhen (Bild 42 und Bild 43). Auch Lochblenden mit Innendurchmessern von 55 mm, 60 mm und 65 mm wurden erprobt. Die besten Resultate ergaben sich mit der 50 mm-Lochblende. Sie wurde im Folgenden stets verwendet.

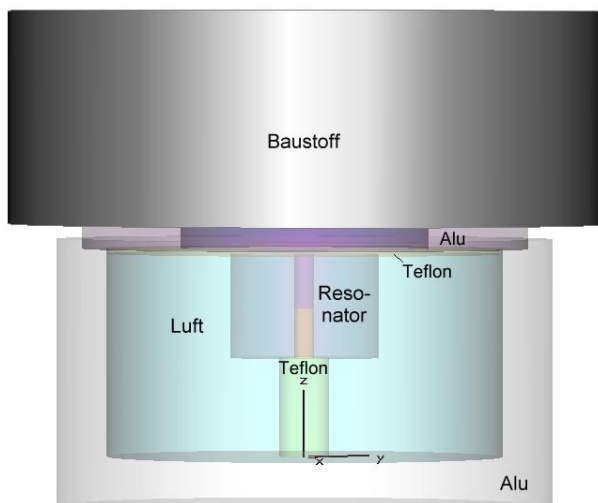


Bild 42. Skizze des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit Lochblende. Die zylindrische Spezialkeramik für Mikrowellen (DK von $\epsilon = 28$, Durchmesser 30 mm, Höhe 21 mm Bohrung 4 mm) sitzt auf einem Teflonhalter, der in einen halboffenen Aluminiumzylinder (Außendurchm. 100 mm, Innendurchm. 80 mm, Höhe 54 mm) eingeschraubt ist. Der Resonator ist mit einem Deckel aus 1 mm Teflonfolie und zusätzlich mit einer Aluminium-Deckelblende (Außen-Durchmesser 90 mm, Innendurchm. 50 mm) abgedeckt. Der Resonator wird mit dieser Deckelblende auf den zu untersuchenden Baustoff aufgesetzt.

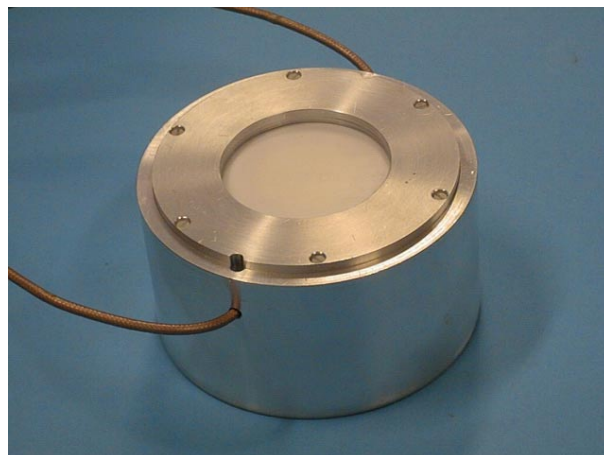


Bild 43. Foto des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit Lochblende.

4.2.2 Finite-Elemente-Simulation

In Analogie zu den in Kap. 4.1.2 beschriebenen Simulationen wurde auch das Resonanzverhalten des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit Lochblende simuliert. Bild 44 zeigt eine farbcodierte Schnittdarstellung der Komponente des E-Feldes senkrecht zur Bildebene. Bild 45 zeigt die simulierte Resonanzfrequenz als Funktion des Realteils der DK. Sie ist um so größer, je höher die Feuchte des Baustoffs ist. Bild 46 stellt die mit dem Störungsrechnungs-Solver berechneten Verluste durch Ansatz realistischer Aluminium-Leitfähigkeit und unter Berücksichtigung des Verlustwinkels $\tan \delta$ des Baustoffs nach Gl. (5) gemäß dem Ansatz von Schlemm [35] dar.

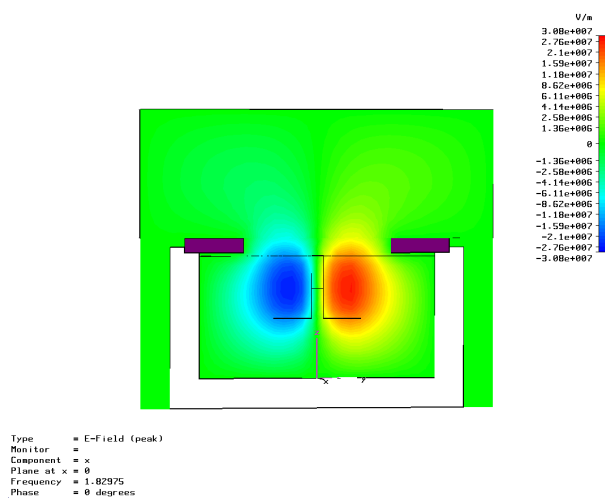


Bild 44. x-Komponente des simulierten elektrischen Feld der TE_{010} -Mode des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit Lochblende in der y-Ebene.

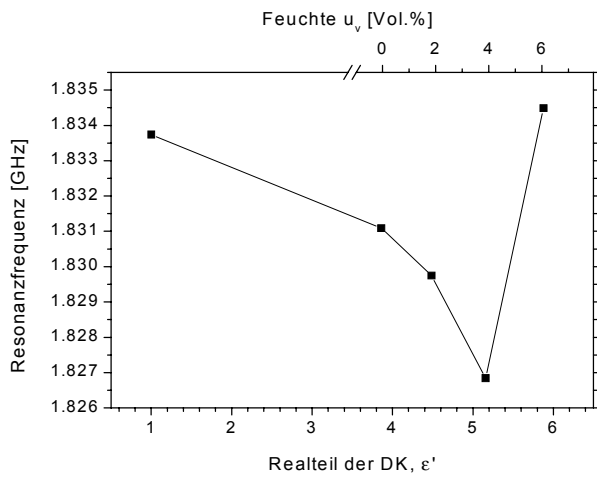


Bild 45. Simulierte Resonanzfrequenz des dielektrischen 1.8 GHz-Resonators mit Deckel als Funktion der DK bzw. der korrespondierenden Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins.

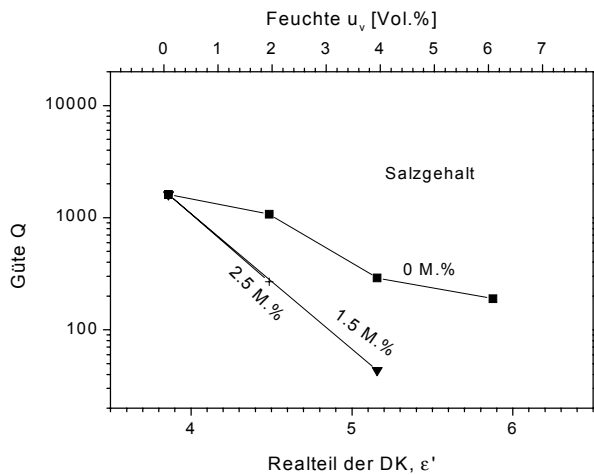


Bild 46. Simulierte Güte der Resonanz des 1.8 GHz-Resonators mit Deckel als Funktion der DK bzw. der korrespondierenden Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins.

4.2.3 Messungen

Die Messungen wurden analog zu den Messungen mit dem halboffenen Resonator durchgeführt. Durch die Alu-Deckelblende und den wegfallenden Styropor-Spacer ist der Baustoff 11 mm näher an der Resonatorkeramik als bei den Messungen mit halboffenem Resonator (Kap. 4.1.3).

Es wurden Messungen mit unterschiedlichem Salzgehalt der Kalksandsteine durchgeführt, indem dem Wasser, mit dem der evakuierte Stein geflutet wurde, unterschiedliche Mengen an NaCl beigegeben wurden. Die Ergebnisse sind in Bild 47 und Bild 48 dargestellt. Bild 49 zeigt die Messwerte in der Güte-Frequenz-Ebene.

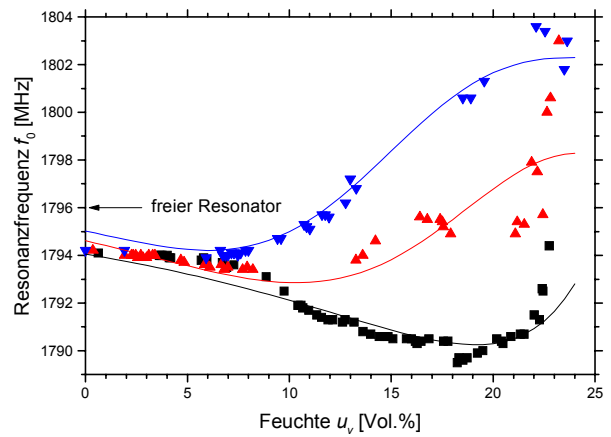


Bild 47. Gemessene Resonanzfrequenz des dielektrischen 1.8 GHz-Resonators mit Lochblende als Funktion der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins, für drei verschiedene Salzgehalte. Der Pfeil „freier Resonator“ gibt den Messwert des Resonators in Luft (ohne aufgelegten Baustoff) an. Die durchgezogenen Linien sind Polynomfits an die Messwerte, siehe Text.

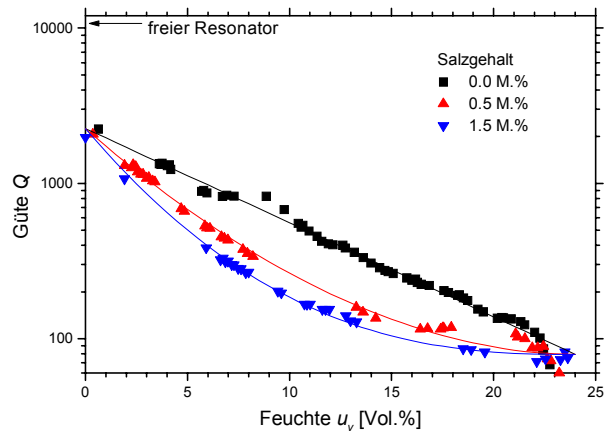


Bild 48. Gemessene Güte der Resonanz des 1.8 GHz-Resonators mit Lochblende als Funktion der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins, für drei verschiedene Salzgehalte.

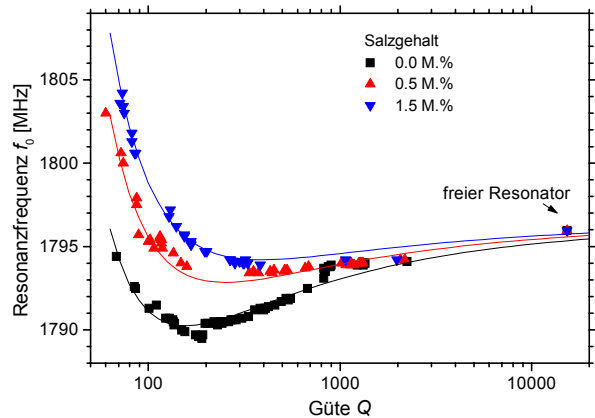


Bild 49. Gemessene Resonanzfrequenz des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit Lochblende als Funktion der gemessenen Güte des aufgelegten Kalksandsteins, für drei verschiedene Salzgehalte. Die durchgezogenen Linien sind Polynomfits an die Messwerte, siehe Text.

4.2.4 Analytische Beschreibung

Die gemessenen Werte für die Frequenz und der Güte als Funktion der Feuchte wurden mit Polynom-Fits approximiert. Für den Graph der Frequenz als Funktion der Güte wurde folgende Approximation gewählt:

$$f_0(Q) [\text{MHz}] = A + \frac{B + C \cdot \sqrt{s_m} [\text{M. \%}]}{(\log_{10} Q)^4} + \frac{D}{(\log_{10} Q)^6} \quad (62)$$

Für den Graph der Güte als Funktion der Feuchte wurde der Ansatz

$$\log_{10} Q = E \cdot \left(1 - \frac{u_v [\text{Vol. \%}]}{24\%}\right)^{1+F \cdot s_m [\text{M. \%}]} + G \quad (63)$$

gewählt. Die Abhängigkeit der Fitparameter von der Salzkonzentration konnte jeweils durch den Fit eines Wurzelgesetzes berücksichtigt werden. Die sich ergebenden Fitparameter sind in Tab. 7 aufgelistet.

Tab. 7. Fitparameter für die Frequenz als Funktion der Feuchte nach Gleichungen (62) und (63).

Parameter	Wert
A	1796.5
B	-433.64
C	100.66
D	1390
E	1.4546
F	1.2676
G	1.8986

Die analytische Approximation gemäß Gln. (62) und (63) ermöglicht die Angabe eines Kalibrationsdiagramms mit Linien gleicher Feuchte und Linien gleichen Salzgehalts. Bild 50 zeigt das derart gewonnene Kalibrationsdiagramm für den 1.8 GHz-Resonator.

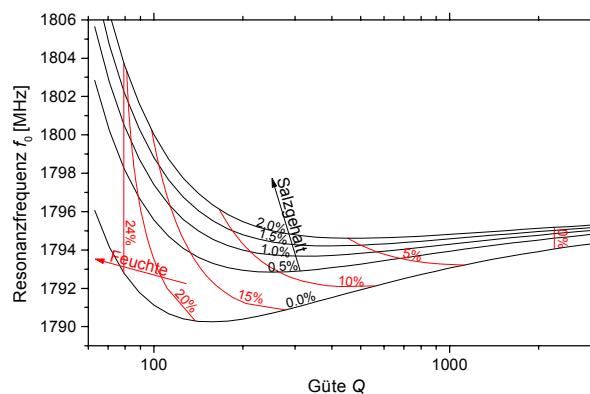


Bild 50. Konturen gleicher Feuchte und gleichen Salzgehalts in einer graphischen Darstellung der Resonanzfrequenz und der Güte der Resonanz des dielektrischen 1.8 GHz-Resonators.

4.2.5 Fazit

Der Aufbau des Resonators mit einer Lochblende führte zu einer verbesserten Stabilität der TE_{018} -Resonanz bei 1.8 GHz im Vergleich zum halboffenen Aufbau (Kapitel 4.1). Ohne Baustoff wurde eine extrem hohe -3 dB-Güte von ca. 15000 gemessen.

Die Simulationsrechnungen mit dem Programm Microwave Studio nach der Methode der Finiten Differenzen ermöglichen ein gutes Verständnis der Feldverteilungen im Resonator und im Baustoff. Die Simulationen zeigen, dass die evaneszenten elektromagnetischen Felder der TE_{018} -Mode („fringe fields“) nur ca. 2 bis 4 cm tief in den Baustoff eindringen. Die Simulation des auf einen Baustoff aufgelegten Resonator bestätigt, dass sich die Resonanz durch Güte- und Transmissionsreduktion verändert, ohne dass nennenswerte Abstrahlungsverluste auftreten. Allerdings stoßen die Simulationsrechnungen bei den gewählten Diskretisierungsgittern von ca. 50 000 Knoten insbesondere im Falle sehr hoher Güten an ihre Grenzen. Um den quantitativen Vergleich der Finite-Differenzen-Simulationen mit den Messergebnissen zu verbessern, wären erheblich verfeinerte Gitter mit mehr Knoten und höhere Genauigkeitsforderungen als Abbruchkriterium erforderlich, die zu erheblich längeren Rechenzeiten führen würden. Es wird erwartet, dass derartige Rechnungen genauere Resultate liefern würden, z.B. um den Umkehrpunkt in der Frequenz präzise nachzuvollziehen.

Vorteile des Lochblende-Resonators sind seine hohe Güte und die daraus resultierende hohe Genauigkeit. Man benötigt keine zusätzliche Abstandsplatte wie im Falle des halboffenen Resonators, der Lochblende-Resonator kann direkt auf den Baustoff aufgesetzt werden. Selbst im Falle maximaler Durchfeuchtung bleibt die Resonanz sehr gut messbar. Daraus resultiert ein großer Feuchte-Messbereich. Außerdem skalieren die Verluste und die Güte sehr gut mit der Feuchte.

Mögliche Nachteile des Lochblende-Resonators sind seine geringere Eindringtiefe (nur ca. 20 mm) im Vergleich zum halboffenen Resonator und die Tatsache, dass die Resonanzfrequenz keine eindeutige Funktion der Feuchte ist. Dies gilt aber nur für sehr große Feuchten und bedeutet in der Praxis keine Einschränkung, weil Feuchte und Salzgehalt eindeutig graphisch durch Eintragen des Messwertpaares f_0, Q in Bild 50 oder numerisch durch Lösen der Gleichungen (62) und (63) nach u_v und s_m bestimmt werden können.

4.3 Resonator für 2.48 GHz

Für eine Weiterentwicklung des dielektrischen Hochgüte-Mikrowellenresonators zu einem kommerziell nutzbarem Messinstrument ist es erforderlich, dass die abgestrahlte Mikrowellenfrequenz in einem postalisch freigegebenen Frequenzbereich liegt. Hier bietet sich das für Haushalts-Mikrowellengeräte freigegebene Band im Bereich von 2.45 GHz an.

4.3.1 Aufbau des Resonators

Unter Verwendung einer zylindrischen Mikrowellenkeramik aus BZT (Barium-Zirkonium-Titanat) mit $\epsilon_r = 29.5$ mit einem Durchmesser von 21.5 mm und einer Höhe von 15 mm wurde ein dielektrischer Mikrowellenresonator für den freigegebenen Frequenzbereich im Bereich von 2.45 GHz realisiert. Der Aufbau ist schematisch in Bild 51 skizziert. Bild 52 zeigt den Resonator.

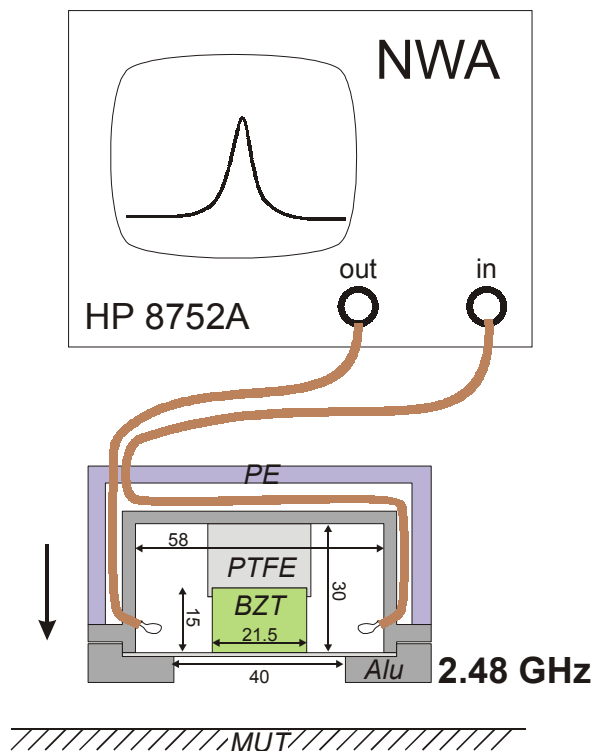


Bild 51. Skizze des dielektrischen Hochgüte-Resonators für 2.48 GHz. Die zylindrische BZT-Spezialkeramik für Mikrowellen (DK von $\epsilon = 29.5$, Durchmesser 21.5 mm, Höhe 15 mm) sitzt in einem Teflonhalter, der in einen halboffenen Aluminiumzylinder (Innendurchmesser 58 mm, Höhe 30 mm) eingeschraubt ist. Der Resonator ist mit einem Deckel aus 1 mm Teflonfolie und zusätzlich mit einer Aluminium-Deckelblende (Innendurchmesser 40 mm, Blendenhöhe 6 mm) abgedeckt. Der Resonator wird mit dieser Deckelblende auf den zu untersuchenden Baustoff (MUT) aufgesetzt.

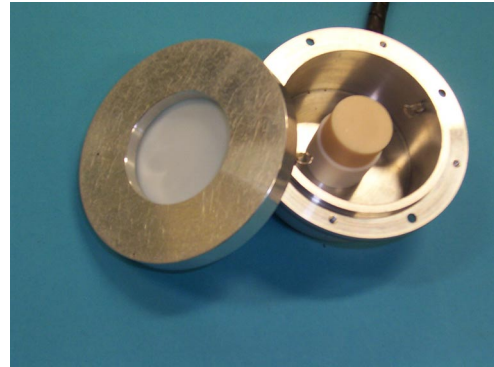


Bild 52. Foto des dielektrischen Hochgüte-Resonators für 2.48 GHz mit geöffneter Deckelblende.

Drei Lochblenden mit einem Innendurchmesser von 40 mm und Höhen von 3, 5 und 6 mm sowie eine mit Durchmesser 38 mm und Höhe 5 mm wurden erprobt. Die 40 mm-Lochblende mit Höhe 6 mm erwies sich als optimal, da sie die höchsten Güten bei trockenen Baustoffen lieferte und auch bei tropfnassem Baustoff noch eine eindeutig identifizierbare Resonanz aufwies.

4.3.2 Finite-Elemente-Simulation

In Analogie zu den Simulationen der beiden Varianten des 1.8 GHz-Resonators wurde auch das Resonanzverhalten des dielektrischen 2.48 GHz-Resonators simuliert. Bild 53 stellt die simulierte Resonanzfrequenz als Funktion des Realteils der DK des Baustoffs (d.h. der Feuchte des Baustoffs) dar.

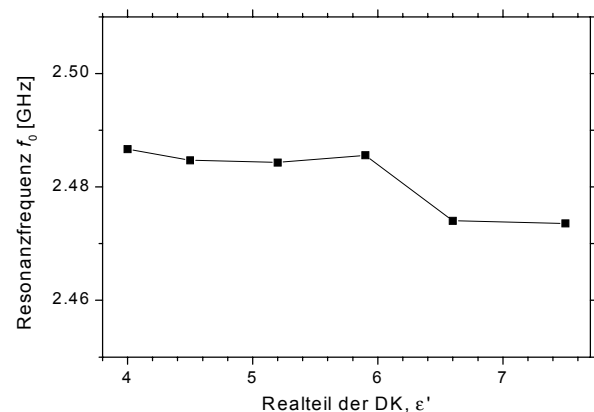


Bild 53. Simulierte Resonanzfrequenz des 2.48 GHz-Resonators als Funktion des Realteils der Dielektrizitätszahl des Materials.

Bild 54 zeigt entsprechend die simulierten Güten der Resonanz als Funktion des Realteils der DK (also der Feuchte) und des Salzgehalts des Baustoffs. Dabei wurden verschiedene Salzgehalte gemäß der Approximation nach Schlemm [35]

gemäß Gl. (5), als unterschiedlich starke dielektrische Verluste $\tan \delta$ des Baustoffs modelliert.

Die Simulationen des 2.48 GHz-Resonators wiesen eine etwas größere Streuung als im Falle des 1.8 GHz-Resonators auf. Außerdem sind die simulierten Güten systematisch zu gering. Dies ist vermutlich auf die kompaktere Geometrie zurückzuführen. Es wurde versucht, durch eine Fixierung des Diskretisierungsgitters auf einheitlich 46464 Knoten etwaige Artefakte durch den Meshgenerator zu verhindern. Die Ursachen für die zu kleinen Güten bei der Simulation sind noch nicht geklärt.

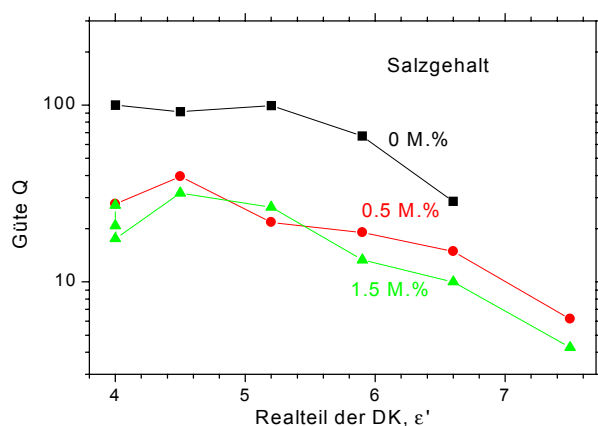


Bild 54. Simulierte Güte der Resonanz des 2.48 GHz-Resonators als Funktion der DK bzw. der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins für verschiedene Salzgehalte.

4.3.3 Messungen

Es wurden Messungen mit unterschiedlichem Salzgehalt der Kalksandsteine durchgeführt, indem dem Wasser, mit dem der evakuierte Stein geflutet wurde, unterschiedliche Mengen an NaCl beigegeben wurden. Die Ergebnisse sind in Bild 55, Bild 56 und Bild 57 dargestellt.

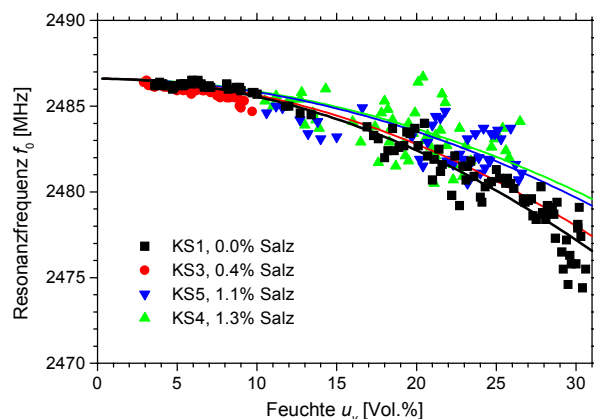


Bild 55. Gemessene Resonanzfrequenz des dielektrischen 2.48 GHz-Resonators als Funktion der Feuchte des gemessenen

nen Kalksandsteins für vier verschiedene Salzgehalte. Die durchgezogenen Linien sind Polynomfits an die Messwerte, siehe Text.

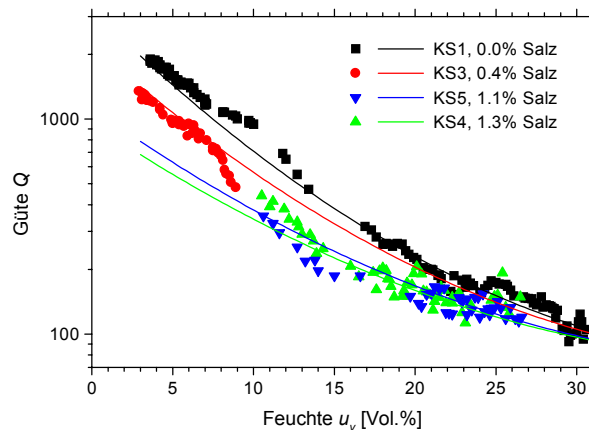


Bild 56. Gemessene Güte der Resonanz des 2.48 GHz-Resonators als Funktion der Feuchte des aufgelegten Kalksandsteins für verschiedene Salzgehalte. Die durchgezogenen Linien sind Polynomfits an die Messwerte, siehe Text.

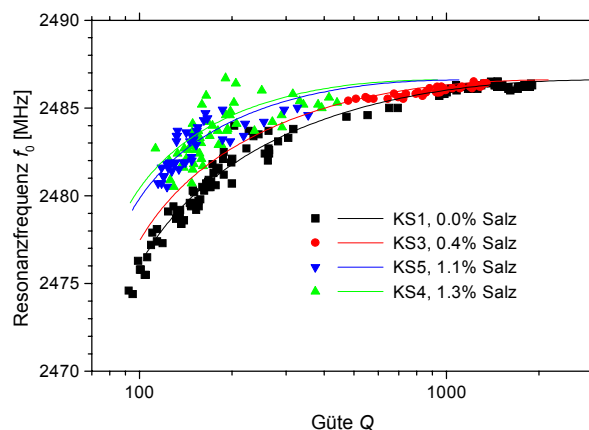


Bild 57. Gemessene Resonanzfrequenz des 2.48 GHz-Resonators als Funktion der gemessenen Güte für verschiedene Feuchten und Salzgehalte des Kalksandsteins. Die durchgezogenen Linien sind Polynomfits an die Messwerte.

4.3.4 Analytische Beschreibung

Die gemessenen Werte für die Frequenz und der Güte als Funktion der Feuchte wurden mit Polynom-Fits approximiert. Für den Graph der Frequenz als Funktion der Feuchte wurde folgende Approximation gewählt:

$$f_0 [\text{MHz}] = a - (b - c \cdot s_m [\text{M. \%}]) \cdot u_v^2 [\text{Vol. \%}] \quad (64)$$

$$\log_{10} Q = (d - e \cdot s_m [\text{M. \%}]) \cdot \left(\frac{u_v [\text{Vol. \%}]}{100} - f \right)^2 + g \quad (65)$$

Die Fitparameter sind in Tab. 8 aufgelistet. Bild 58 zeigt das mit diesen Formeln berechnete Kalibra-

tionsdiagramm mit den Linien gleicher Feuchte und gleichen Salzgehalts.

Tab. 8. Fitparameter für die Frequenz als Funktion der Feuchte nach Gleichungen (64) und (65) als Funktion der Salzkonzentration des Kalksandsteins.

Parameter	Wert
a	2486.6
b	0.01045
c	0.00251
d	8.4334
e	2.1627
f	0.4403
g	1.8734

Wenn man die gemessene Resonanzfrequenz als Funktion der gemessenen Güte aufträgt, vgl. Bild 57, wird offensichtlich, dass sich eine eindeutige Bestimmung von Feuchte und Salzgehalt durchführen lässt. Entweder erhält man Feuchte und Salzgehalt eindeutig graphisch durch Eintragen des Messwertpaares f_0 , Q in die Kalibrationsgrafik Bild 58 oder man bestimmt sie numerisch durch Lösen der Gleichungen (64) und (65) nach u_v und s_m .

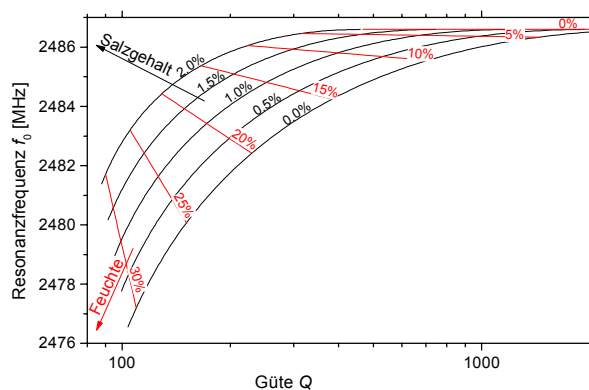


Bild 58. Konturen gleicher Feuchte und gleichen Salzgehalts in einer graphischen Darstellung der Resonanzfrequenz und der Güte der Resonanz des dielektrischen 2.48 GHz-Resonators.

4.3.5 Fazit

Die TE_{018} -Resonanzmode des 2.48 GHz-Resonators war stabil, aber nicht so gleichmäßig und symmetrisch wie die Resonanz des 1.8 GHz-Resonators mit Lochblende. Ohne Baustoff wurde eine -3 dB-Güte von ca. 14 000 gemessen.

Vorteile des 2.48-GHz-Resonators sind seine hohe Güte und die daraus resultierende hohe Genauigkeit. Selbst im Falle maximaler Durchfeuchtung bleibt die Resonanz messbar. Daraus resultiert ein großer Feuchte-Messbereich. Außerdem skalieren

die Verluste und die Güte monoton mit der Feuchte.

Nachteile des 2.48-GHz-Resonators liegen in der geringen Eindringtiefe (nur ca. 20 mm) im Vergleich zum halboffenen Resonator und in der größeren Datenstreuung im Vergleich zum 1.8 GHz-Lochblende-Resonator.

4.4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass Hochgüte-Mikrowellen-Resonatoren sehr gut geeignet sind, um zerstörungsfrei den Feuchte- und Salzgehalt von Baustoffen im oberflächennahen Bereich zu bestimmen. Das entwickelte Verfahren beruht auf der Messung der Frequenzverstimmung und der Dämpfung des Resonators beim Auflegen auf feuchte und salzhaltige Baustoffe.

Zwei der realisierten Resonatoraufbauten, die bei 1.8 GHz bzw. 2.48 GHz arbeiten, wurden detailliert charakterisiert. Es wurden Messungen an Kalksandsteinen mit variabler Feuchte und Salzgehalt durchgeführt und die Messergebnisse durch vergleichende Simulationsrechnungen nach der Finite-Differenzen-Methode verifiziert. Anhand der Messergebnisse wurden Kalibrationsdiagramme und analytische Approximationen ermittelt, die es ermöglichen, die Feuchte und den Salzgehalt des Baustoffs unabhängig voneinander zu bestimmen.

Die besten Resultate mit der geringsten Messwertstreuung wurden mit dem 1.8 GHz-Resonator-Aufbau erzielt. Der 2.48-GHz-Resonator erscheint für eine potentielle kommerzielle Weiterentwicklung vielversprechend zu sein. Dazu sollte allerdings eine Überarbeitung der Resonator-Gehäuse-Geometrie und der Signal-Ein- und Auskopplung durchgeführt werden.

Wegen ihrer auf wenige Zentimeter limitierten Eindringtiefe sind die dielektrischen Resonatoren für den fahrzeugbasierten Einsatz auf Beton-Brückenplatten weniger gut geeignet. Es handelt sich aber um ein vielversprechendes Verfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Feuchte von Baustoffen im oberflächennahen Bereich bis ca. 4 cm Tiefe. In Verbindung mit miniaturisierten Netzwerkanalysator-Elektronikplatinen, die z.B. an der TU Hamburg-Harburg entwickelt werden [46], kann ein praxistaugliches und kostengünstiges Messgerät für die Bauwerksinspektion realisiert werden.

5 Messungen am Beton-Probekörpern

5.1 Chlorid-Probekörper der BAST

5.1.1 Herstellung des Chlorid-Probekörpers

Zur Evaluierung der Methode wurde von der BAST ein Beton-Probekörper hergestellt, der so konzipiert ist, dass er einer typischen Beton-Brückenplatte nahe kommt. Der Körper mit den Außenmaßen $3\text{ m} \times 1.4\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ ist an der Ober- und Unterseite jeweils mit Stahlbügeln (Durchmesser 12 mm) bewehrt, die in einem regelmäßigen $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ Gitter parallel zur Oberfläche angeordnet sind, vgl. Bild 59. Die nominelle Betondeckung beträgt 5 cm. Für die Herstellung wurde ein Beton B35 nach DIN 1045 verwendet. Das Größtkorn des Zuschlags betrug 16 mm, der Zement CEM II ist für den Brückenbau zugelassen.



Bild 59. Herstellung des Bewehrungskorbes für den Chlorid-Probekörper.



Bild 60. Der Bewehrungskorb mit den Kunststoffrohren für die Präparation der Chloridnester.

An fünf kreisförmigen Positionen auf der Oberfläche wurden während der Herstellung Chloridnester eingebracht. Dazu wurden geschlitzte Kunststoffrohre (vgl. Bild 60 und Bild 61) in den Probekörper eingebracht, die fünf Nester mit 30 cm-Durchmesser abgrenzen.



Bild 61. Eingeschalter Bewehrungskorb vor dem Betonieren, mit den Kunststoffrohren für die Präparation der Chloridnester.



Bild 62. Betonieren des Probekörpers und der Chloridnester. In die Kunststoffrohre wird jeweils eine separat mit unterschiedlichem Salzgehalt präparierte Betonmischung eingebracht.

An diesen durch die Kunststoffrohre separierten Stellen wurden fünf verschiedene separate Betonmischungen, die mit zusätzlicher Salzlösung präpariert wurden, eingebracht (Bild 62). Durch Kochsalzzugabe wurden die Chloridgehalte der fünf Nester zu 0.5%, 1%, 1.5%, 2% und 2.5% des Zementgewichts präpariert. Nach kurzer Abbindezeit wurden die Kunststoffrohre der Chloridnester herausgezogen, um einen homogenen Beton mit kontinuierlichem Chloridgehalt-Gradienten der Nester zu erhalten (Bild 63).



Bild 63. Betonieren des Probekörpers und der Chloridnester. Nach kurzer Abbindezeit wurden die Kunststoffrohre der Chloridnester herausgezogen.

5.1.2 Magnetische Messungen

Mit Magnetsensor und Radar wurden Scans entlang der Längsseite des Probekörpers durchgeführt. Die magnetischen Messungen erfolgten mit dem Messkopf Version 3.

Exemplarisch wird der Magnet-Scan bei $y = 0.25$ m gezeigt. Dieser Scan verläuft über zwei der vorbereiteten Chloridnester, die bei $x = 0.95$ m bzw. $x = 2.15$ m liegen. Die Ergebnisse der magnetischen Messung, die Magnetfeld-Komponenten H_x und H_z als Funktion der Scankoordinate x , zeigt Bild 64.

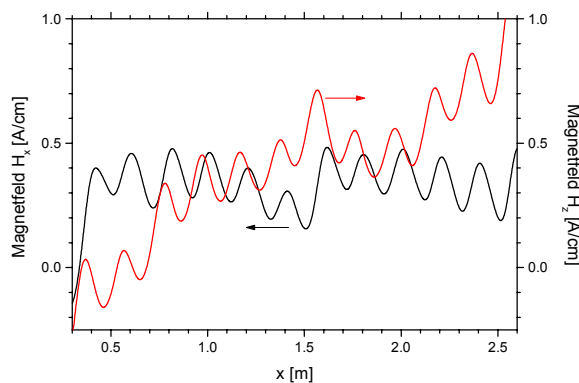


Bild 64. Magnetische Feldkomponenten H_x und H_z , gemessen auf dem Probekörper.

5.1.3 Radar-Messungen

Die Radar-Messungen wurden mit einem kommerziellen Georadarsystem (RAMAC by MALÅ GeoScience) durchgeführt. Bild 65 zeigt das Resultat eines Radar-Scans von $x = 0$ to 3 m bei $y = 0.25$ m. Jeder Bügel, der quer zur Scanrichtung verläuft, erscheint als eine Hyperbel im Radar-B-Scan.

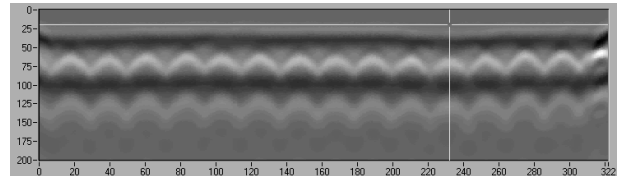


Bild 65. Gemessenes Radar Reflektionssignal (B-Scan) während eines Scans in x -Richtung über den Probekörper bei $y = 0.25$ m. Die Abbildung zeigt das Signal als Grauwert als Funktion der Position x (horizontal) und der Reflektionszeit t (vertikal). Beide Skalen sind in Pixel: die horizontale x -Skala beträgt: 1 Pixel = 9.38 mm, die vertikale Zeitskala ist: 1 Pixel = 32.5 μ s. Durch numerische Bestimmung (Polynom-Fit) des Scheitels jeder Hyperbel wurden die horizontale (x) und die vertikale (t) Position jedes Bügels extrahiert.

5.1.4 Auswertung

Durch numerische Differentiation und FIR-Filterung wurde dann die dritte Ableitung des tangentialen Feldes nach der Scanrichtung x , die Gradientenkomponente $H_{x,xxx}$, und die zweite Ableitung des Vertikalfeldes, die Komponente $H_{z,xx} = H_{x,xz}$ berechnet. Bild 66 zeigt das Ergebnis.

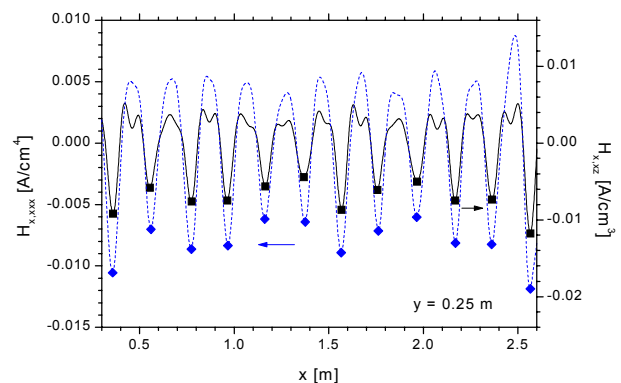


Bild 66. Magnetfeld-Gradienten-Komponenten $H_{x,xxx}$ und $H_{x,xz}$, bestimmt mittels drei- bzw. zweimaliger numerischer Differentiation der gemessenen Komponenten H_x und H_z nach x . Die Positionen der Minima der Gradienten-Komponenten bezeichnen die Positionen x_B der Bügel (Symbole).

Die Positionen der Minima der Gradientenkomponenten wurden als (magnetisch) exakte Positionen x_B der Bügel ausgewählt. Unter Verwendung der Gleichung (67) wurde die Tiefe der Bügel als Quotient der beiden Gradienten-Komponenten berech-

net. Das Resultat ist als durchgezogene Linie in Bild 67 dargestellt. Die schwarzen Quadrate bezeichnen die Werte an den Positionen x_B der Bügel, die als jeweilige, magnetisch bestimmte Tiefe z der Bügel interpretiert wurden. Diese Werte stimmen relativ gut mit den Werten überein, die mit einem kommerziellen Überdeckungsmessgerät (Hilti Ferroscan) bestimmt wurden. An zwei Positionen wurde die genaue Tiefe durch anschließendes Öffnen des Beton verifiziert. Es stellte sich heraus, dass die Betondeckung in der Realität etwas größer war als der geplante Wert von 5 cm, vgl. Bild 67.

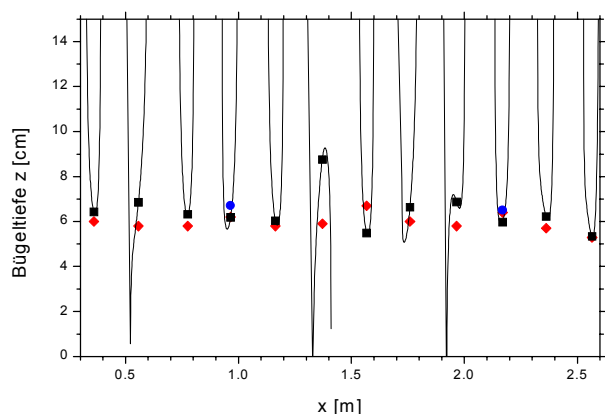


Bild 67. Tiefe z der Bügel unter der Betonoberfläche gemäß Berechnung aus dem Quotient der magnetischen Feldgradienten-Komponenten $3H_{z,xx}$ und $H_{x,xxx}$ gemäß Gl. (67). Die Quadrate bezeichnen die Tiefenwerte an den jeweiligen Bügelpositionen x_B . Ein zusätzlicher Abstand von 2,4 cm zwischen den Magnetometern und der Betonoberfläche wurde berücksichtigt. Zum Vergleich wurden die Tiefenwerte angegeben, die mit einem kommerziellen Betondeckungsmessgerät (Hilti Ferroscan) gemessen wurden (rote Rauten). An zwei Positionen wurde die Tiefe durch Öffnen des Beton verifiziert (blaue Kreise). Mit Ausnahme der Werte bei $x_B = 1,37$ m und $x_B = 1,57$ m sind die magnetisch bestimmten Tiefen in guter Übereinstimmung mit den Betondeckungs-Messungen.

Mit Gl. (66) und einem Polynom-Fit an die gemessenen Radar-Daten wurden die Bügelorte als Scheitelpunkte der Hyperbeln bestimmt. Diese Positionen waren in guter Übereinstimmung mit den Bügelorten, die aus den Magnetfeldmessungen abgeleitet wurden.

$$t = \frac{2\sqrt{\epsilon_r}}{c} \sqrt{(x - x_B)^2 + z^2} \quad (66)$$

$$z = \frac{3H_{z,xx}}{H_{x,xxx}} \quad (67)$$

Durch Einsetzen der Reflektionszeit t aus der Radar-Messung (Bild 65) und der Bügeltiefe z aus der magnetischen Messung (Bild 67) in Gl. (66) wurde die effektive Dielektrizitätszahl ϵ_r des Beton bestimmt. Bild 68 zeigt einen Plot der ϵ_r -Werte als

Funktion der Bügelposition x_B . In der Nähe der Bügel bei $x_B = 0,97$ m und $x_B = 2,17$ m wurde der Chloridgehalt chemisch nach Bohrmehl-Probennahme von der Baustoff- und Bodenprüfstelle Kassel bestimmt. Werte von 0,6 bzw. 0,8 Masse% wurden gefunden. Wenn man die Werte bei $x = 1,37$ m und $x = 1,57$ m, die vermutlich aufgrund einer fehlerhaften magnetisch bestimmten Tiefe aus der Reihe fallen, außer Acht lässt, so zeigt die Dielektrizitätszahl einen systematischen Anstieg im Bereich der zwei Chloridnester. Bild 69 zeigt die auf diese Weise ermittelte Karte des Realteils der Dielektrizitätszahl des Probekörpers.

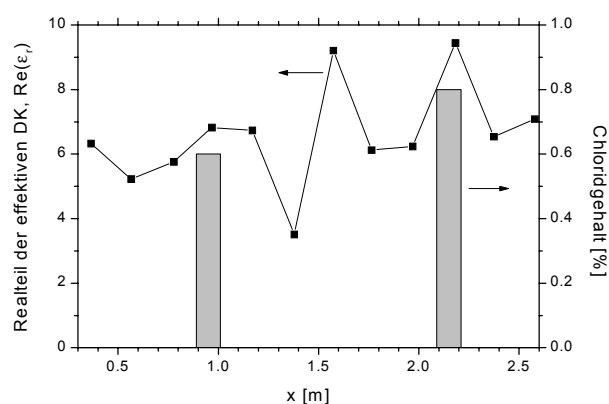


Bild 68. Effektive Dielektrizitätszahl ϵ_r des Beton, bestimmt aus dem Quotienten aus gemessener Radar-Laufzeit und magnetisch bestimmter Tiefe der Querbügel.

5.1.5 Fazit

Es wurden Messungen am Chlorid-Probekörper der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) mittels magnetischem Messkopf und Bodenradar durchgeführt. Die Positionen der oberflächennahen Bewehrung wurde mittels automatisierter SAFT-Analyse der Radardaten ermittelt, vgl. Kap. 3.2.3. Die minimale Laufzeit der Radarwellen bis zur Bewehrung wurden ermittelt. Mit der magnetischen Messmethode wurde die Tiefe der Bewehrung aus den differenzierten Magnetfelddaten unabhängig von der Radar-Laufzeitmessung ermittelt.

Aus dem Quotient der Radar- und Magnetdaten der oberen Bewehrungslage wurde die effektive Dielektrizitätskonstante (DK) des Beton des Probekörpers lokal berechnet und die räumliche Verteilung als Karte dargestellt (Bild 69). An einigen Positionen über den Chloridnestern wurde dabei eine signifikant erhöhte DK festgestellt. Allerdings ergab sich auch eine starke Streuung der DK-Werte aufgrund von Streuungen in der magnetischen Tiefenbestimmung. Hier ist noch eine Verbesserung des Mess- und Auswerteverfahrens erforderlich,

um die Genauigkeit zu erhöhen. Es ist allerdings auch zu berücksichtigen, dass bei zu trockenem Baustoff keine Unterscheidung des Salzgehaltes mehr möglich ist, vgl. Bild 2.

5.2 Neubetonierung der Chloridnester

5.2.1 Motivation

Die Untersuchungen am Chlorid-Probekörper haben gezeigt, dass es bei trockenem Beton praktisch unmöglich wird, mit einer elektromagnetischen Messung im GHz-Bereich den Salzgehalt zu bestimmen. Der Beton des Chlorid-Probekörpers war von so guter Qualität, dass es nicht möglich war, ihm nachträglich wieder Wasser zuzuführen. Daher wurden die Chloridnester ausgebohrt und mit möglichst „schlechtem“ Beton nachbetoniert. Dazu wurde eine Mischung mit einem Wasser/Zement-Wert von $w/z = 0.7$ präpariert, um einen möglichst porösen, saugfähigen Beton zu erhalten.



Bild 70. Der Chlorid-Probekörper der BAST nach dem Ausbohren der Chloridnester (links) und während der Neubetonierung.

5.2.2 Radar-Messungen

Während der Erhärtungszeit wurden die neubetonierten Stellen in regelmäßigen Zeitabständen mit Radar untersucht. Bild 71 zeigt exemplarisch drei dieser Radar-Scans, die sowohl über die neubetonierten Nester als auch über den unveränderten Bereich verliefen. Man erkennt deutlich, dass sich die Laufzeitverlängerung an den neubetonierten Messpositionen MS4 und MS2 mit der Zeit verringert. Bild 72 stellt die aus den Radar-Scans bestimmte Laufzeitveränderung während der Erhärtungszeit graphisch dar. Die aus der gemessenen Laufzeit berechnete effektive Dielektrizitätszahl ϵ_r ist in Bild 73 aufgetragen.

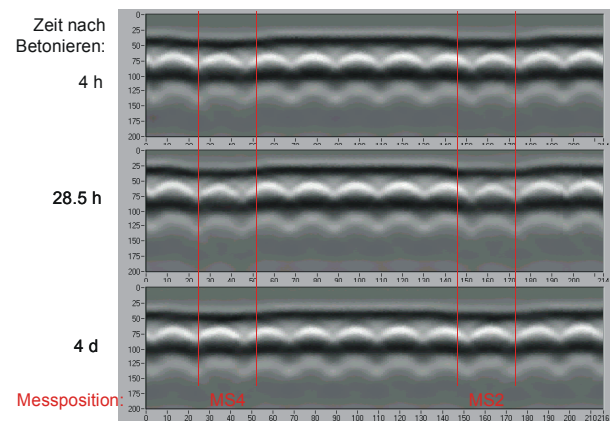


Bild 71. Gemessene Radar-Scans über die frisch betonierten Bereiche MS4 und MS2. Oben: nach 4 h Erhärtungszeit, Mitte: nach 28.5 h, unten: nach 4 d Erhärtungszeit.

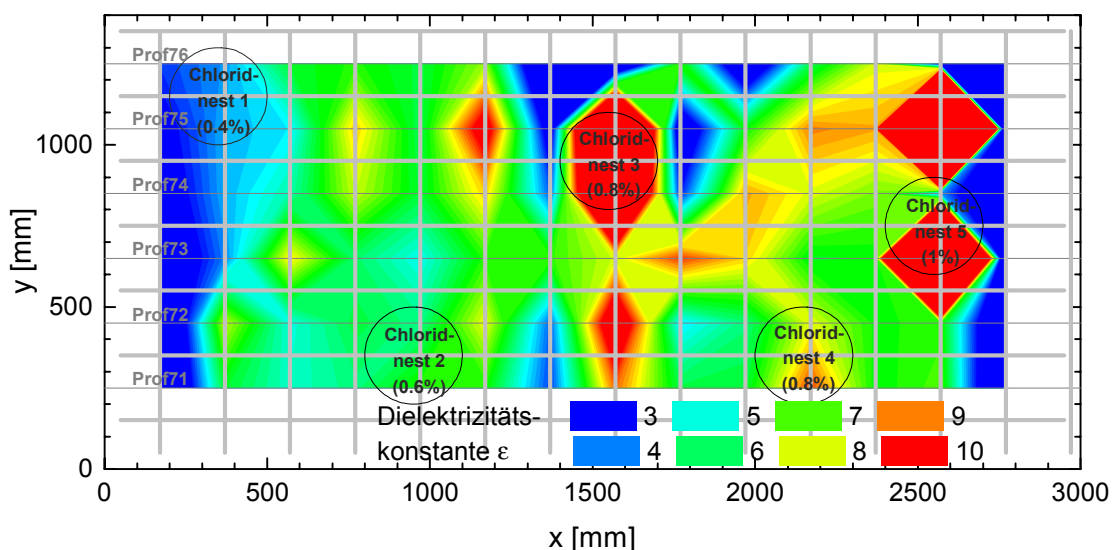


Bild 69. Kartographische Darstellung der effektiven Dielektrizitätskonstante ϵ des Chlorid-Probekörpers, ermittelt aus der Radar-Laufzeit und der magnetischen Tiefenbestimmung.

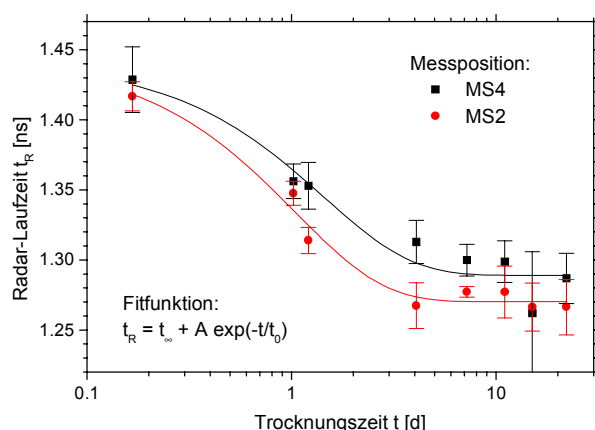


Bild 72. Gemessene Radar-Laufzeit bis zum ersten Bügel als Funktion der Erhärtungszeit nach Neubetonieren bei $t = 0$.

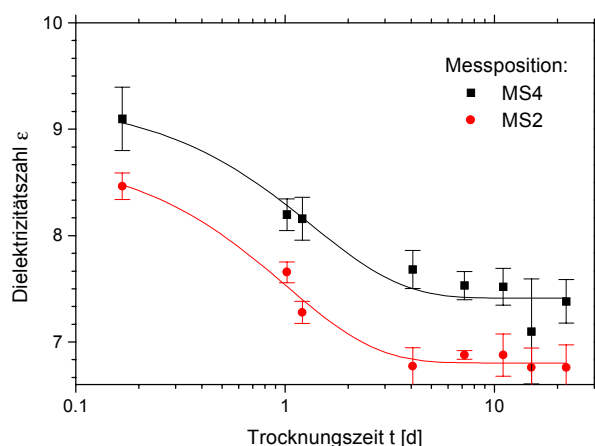


Bild 73. Effektive Dielektrizitätszahl ϵ_r des Beton als Funktion der Erhärtungszeit nach Neubetonieren bei $t = 0$, bestimmt aus dem Quotienten aus gemessener Radar-Laufzeit und bekannter Tiefe der Querbügel.

5.2.3 Resonator-Messungen

Die neubetonierten Stellen wurden sowohl kurz nach dem Betonieren als auch 16 Wochen später mit dem 1,8 GHz-Resonator mit einer Aluminium-Deckelblende von 50 mm \varnothing untersucht. Die Messergebnisse für die Resonanzfrequenz f_0 und die Güte Q sind in Tab. 9 dargestellt. Durch Einzeichnen der Messwerte in das Kalibrations-Diagramm (Bild 50) wurde verifiziert, dass die Messwerte nahe der Kurve für feuchte Materialien ohne Salz liegen. Durch Auflösen der Gleichungen (62) und (63) wurde die Feuchte des Beton am Messpunkt ermittelt, vgl. Tab. 9.

Tab. 9. Resonanzfrequenz und Güte an den neu betonierten Stellen, 15 min bzw. 16 Wochen nach dem Betonieren gemessen. Die Feuchte wurde anhand der Kalibrationskurven (Bild 50) bestimmt.

Zeit	Messposition	f_0 [MHz]	Q [-]	Feuchte
15 min	MS1	1790.6	86	23.0%
	MS2	1790.8	93	22.4%
	MS5	1791.4	103	21.6%
112 d	MS1	1793.1	730	8.0%
	MS2	1790.9	374	12.5%
	MS5	1790.6	389	12.4%

5.2.4 Fazit

Der Feuchtegehalt und der zeitliche Erhärtungsverlauf der neubetonierten Nester ließ sich mittels Radar-Laufzeitanalyse und Resonatormessung eindeutig messen und nachvollziehen. Der Trocknungsvorgang ist in der Reduktion der Dielektrizitätszahl (Bild 73) abzulesen.

5.3 Kleine Beton-Referenzkörper

5.3.1 Motivation

Beim Neubetonieren der Chloridnester wurden auch mehrere kleine Beton-Referenzkörper aus der gleichen Mischung (Wasser/ Zement-Wert von $w/z = 0.7$) mitbetoniert.

Die Betonproben (Würfel 10 cm \times 10 cm \times 10 cm bzw. Zylinder \varnothing 15 cm, Höhe 10 cm) wurden bis zur Gewichtskonstanz (ca. 2 Wochen) abgepumpt und dann mit Leitungswasser geflutet. Die drei Würfel erreichten Wassersättigungsgrade von 12.7 Vol.% (Nr. 1), 17.5 Vol.% (Nr. 4) bzw. 15.7 Vol.% (Nr. 5). Der Beton erwies sich somit wirklich als sehr porös und saugfähig. Anschließend wurden sie im Labor an Luft getrocknet. Über einen Zeitraum von 85 Tagen wurde durch regelmäßige Wägung der Feuchtegehalt ermittelt (vgl. Bild 74) und jeweils eine Resonatormessung durchgeführt.

Anschließend wurden zwei Betonwürfel (Nr. 1 und Nr. 4) wiederum vakuumgetrocknet und dann mit in Leitungswasser gelöstem NaCl (Reinheit 99.5%) geflutet. Der massebezogene Salzgehalt der Betonwürfel wurde aus der maximalen Wasseraufnahme und dem Mischungsverhältnis des Salzwassers zu 0.6 M.% (Nr. 1) bzw. 1.4 M.% (Nr. 4) bestimmt.

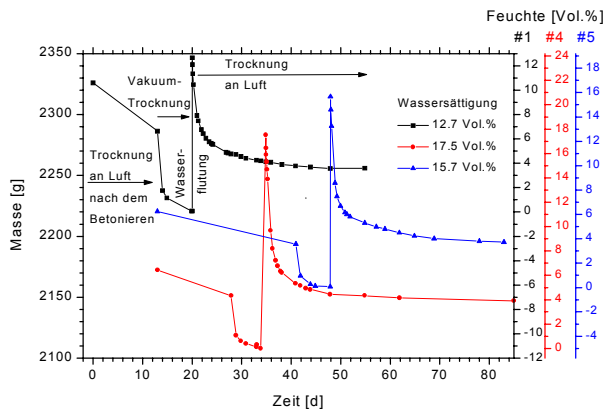


Bild 74. Masse der Betonwürfel als Funktion der Zeit. Die Zeit $t = 0$ bezeichnet den Zeitpunkt des Betonierens. Nach einigen Tagen wurden die Würfel unter Vakuum weitergetrocknet, nach einer weiteren Woche wurden sie jeweils mit Leitungswasser geflutet und danach an Luft getrocknet. Der jeweilige Feuchtegehalt (rechte Achsen) wurde auf das Vakuum-Endgewicht bezogen und in Vol.-% angegeben.

5.3.2 Resonator-Messungen

Die Messungen wurden analog zu den Messungen an Kalksandsteinen (KS) mit dem 1.8 GHz-Resonator mit einer Aluminium-Deckelblende von 50 mm \varnothing durchgeführt.

Die folgenden Abbildungen (Bild 75 bis Bild 77) zeigen die Ergebnisse der Mikrowellen-Resonatormessungen an den Betonwürfeln. Zum Vergleich sind die Resultate an Kalksandstein angegeben: die Ergebnisse der Fits f_u bzw. f_Q an die Messwerte nach Gl. 62 sind als durchgezogene Linien skizziert.

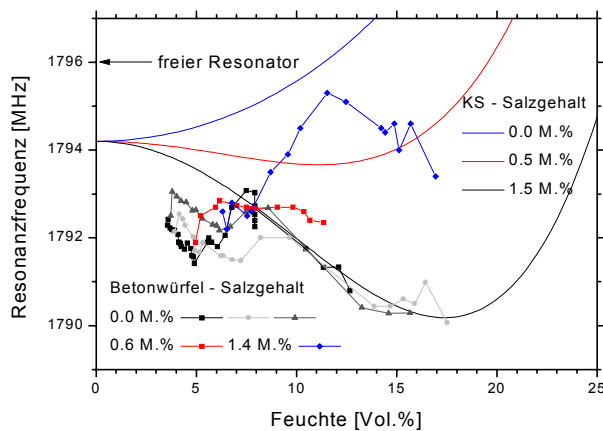


Bild 75. Gemessene Resonanzfrequenz des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit 50 mm Lochblende als Funktion der Feuchte des aufgelegten Baustoffs für verschiedene Salzgehalte der Betonwürfel. Die Kalksandstein-Daten sind durch ihre Polynomfits approximiert.

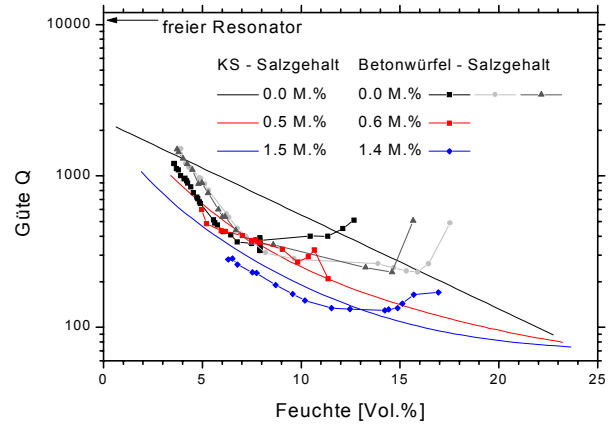


Bild 76. Gemessene Güte der Resonanz des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit 50 mm Lochblende als Funktion der Feuchte des aufgelegten Baustoffs für verschiedene Salzgehalte der Betonwürfel.

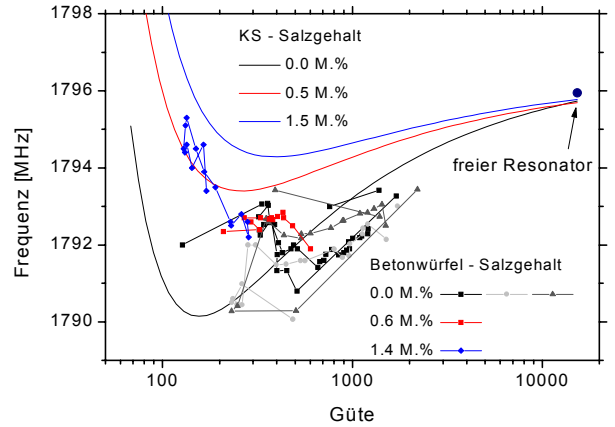


Bild 77. Gemessene Resonanzfrequenz des dielektrischen Hochgüte-Resonators mit 50 mm Lochblende als Funktion der gemessenen Güte des aufgelegten Baustoffs für verschiedene Salzgehalte der Betonwürfel.

5.3.3 Radar-Messungen

Es wurden Radar-Messungen an drei zylindrischen Betonproben (Durchmesser 150 mm, Höhe 100 mm) mit $w/z = 0.7$ durchgeführt. Alle drei wurden je zwei Wochen im Exsiccator evakuiert und dann mit (Salz-)Wasser geflutet. Die Maximalfeuchte betrug zwischen 13 und 16 Vol.%, der Salzgehalt betrug 0 M.% (Nr. 14), 0.3 M.% (Nr. 16) bzw. 0.9 M.% (Nr. 17). Die Radar-Messungen wurden nach Einsetzen der Betonzyylinder in einem PVC-Rahmen durchgeführt (Foto), wobei sich ein 12 mm-Bügel direkt unter dem Betonzyylinder befand.



Bild 78. Radar-Messung der Betonzylinder.

In den Radar-Scans wurde die Reflexion des Bügels identifiziert und aus der Laufzeitverschiebung gegenüber dem Oberflächenreflex die Wellengeschwindigkeit v bzw. die effektive Dielektrizitätszahl gemäß Gl. (40) bestimmt. Bild 79 zeigt das Ergebnis als Funktion der Feuchte der drei Zylinder.

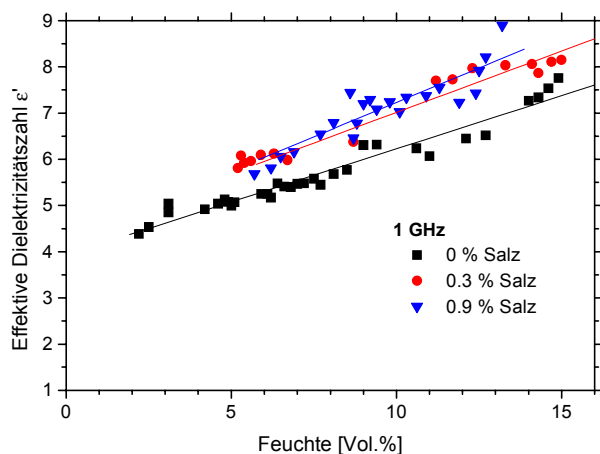


Bild 79. Gemessene effektive Dielektrizitätszahl des Beton als Funktion der Feuchte für verschiedene Salzgehalte, ermittelt aus den Radarmessungen.

Die Radar-Messungen wurden auch hinsichtlich der Amplitude des Bügel-Reflexes untersucht. Bild 80 zeigt den gemessenen Reflektionskoeffizienten am Metallbügel, d.h. die reflektierte Amplitude des Radar-Signals des Bügels bezogen auf die Sendeamplitude. Der so experimentell ermittelte Reflektionskoeffizient wurde verwendet, um mit Gl. (47) den Verlustwinkel des Materials zu bestimmen. Zum Vergleich wurde auch hier das erwartete Verhalten berechnet: Bild 80 zeigt auch den mittels Gl. (45) berechneten Reflektionskoeffizienten bei 2.45 GHz. Die Übereinstimmung ist frappierend gut.

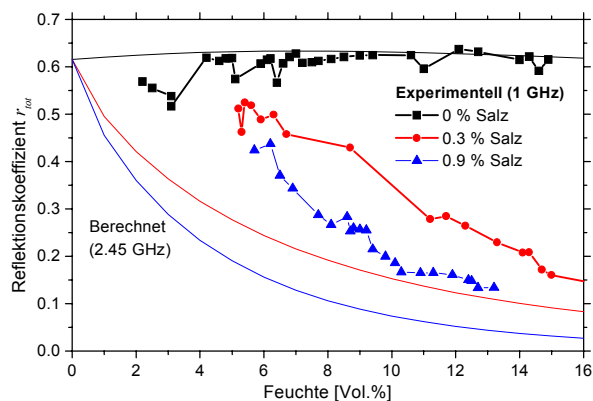


Bild 80. Gemessene reflektierte Amplitude des Radar-Signals des Bügels, bezogen auf die Sendeamplitude, als Funktion der Feuchte für verschiedene Salzgehalte, und berechneter Reflektionskoeffizient an einer Grenzfläche Material-Metall in 10 cm Tiefe mit Materialparametern für 2.45 GHz nach Schlemm [35].

Durch Einsetzen in Gl. (39) wurden die experimentellen Werte für die effektive Dielektrizitätszahl verlustkorrigiert. Bild 81 zeigt das Resultat. Der korrigierte Realteil der DK ist erwartungsgemäß kaum noch vom Salzgehalt abhängig. Zum Vergleich zeigt das erwartete Verhalten, wenn man die Dielektrizitätszahl nach den Formeln von Schlemm, Gl. (3) und (5), berechnet. Der Verlauf ist sehr ähnlich. Eine quantitative Übereinstimmung ist ohnehin nicht zu erwarten, da die Materialparameter von Schlemm für 2.45 GHz angegeben sind, unsere Radarmessungen jedoch bei 1 GHz durchgeführt wurden.

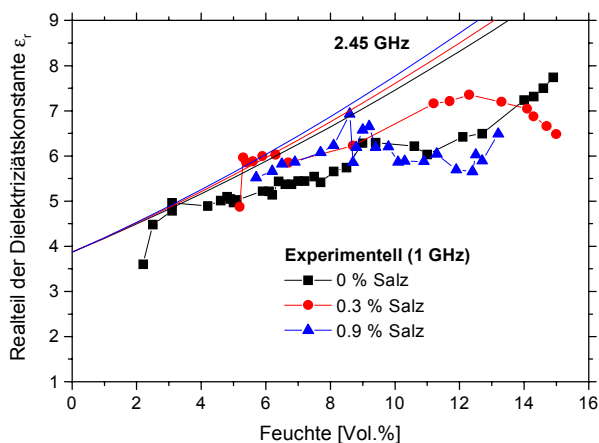


Bild 81. Auf Verluste korrigierter Realteil der gemessenen effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als Funktion der Feuchte für verschiedene Salzgehalte, ermittelt aus den Radarmessungen, und berechnete effektive Dielektrizitätszahl des Beton unter Verwendung der Materialparameter für 2.45 GHz nach Schlemm [35].

5.3.4 Fazit

Bei den Messungen an den Betonwürfeln wurde eine deutlich stärkere Messwertstreuung beobachtet als bei den Messungen an Kalksandsteinen. Dies ist aufgrund der wesentlich stärkeren Inhomogenität des Beton aufgrund der Zuschläge auch zu erwarten. Es zeigte sich, dass die Messwerte an dem Betonwürfel mit 0.6 M.% Salzgehalt (rote Symbole in Bild 75 bis Bild 77) im Rahmen der Streuungen nicht von den Werten der Betonwürfel ohne Salz (graue Symbole) unterscheidbar waren. Nur bei 1.4 M.% Salzgehalt (blaue Symbole) lässt sich eine Unterscheidung vornehmen, da die Messwerte signifikant kleinere Güten und eine Frequenzverschiebung aufwiesen.

Die Radar-Messungen an den kleinen zylindrischen Beton-Referenzkörpern mit unterliegendem Bewehrungsbügel haben gezeigt, dass es möglich ist, durch Auswertung der Radar-Laufzeit bei bekannter Bügeltiefe den Realteil der effektiven Dielektrizitätszahl zu bestimmen. Er hängt erwartungsgemäß nur schwach vom Salzgehalt ab. Durch Auswertung der Radar-Amplitude (Reflektionskoeffizient) wurden die Verluste (Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl) bestimmt. Für die Beton-Referenzkörper wurde gezeigt, dass die verlustkorrigierte Dielektrizitätszahl praktisch nur von der Feuchte der Körper abhängt, jedoch nicht mehr vom Salzgehalt. Andererseits liefert der Reflektionskoeffizient eine eindeutige Aussage zum Salzgehalt der Betonkörper, vorausgesetzt die Feuchte ist nicht zu gering.

5.4 Asphalt-Überdeckung

5.4.1 Motivation

Ein wesentlicher Vorteil des Radar-Magnet-Verfahrens in Bezug auf die Anwendung auf Brückenbauwerken ist die potentielle Durchführbarkeit der Messung ohne Entfernung der Asphalt-Fahrbahndecke. Um die Anwendbarkeit des Verfahrens bei Vorhandensein einer Asphalt-Deckschicht zu demonstrieren, wurde bei der BAST ein Gussasphalt-Probekörper mit Holzrahmen gefertigt. Die Asphaltplatte hat die Abmessungen 80 cm × 30 cm bei einer Asphaltstärke von 8 cm. Sie lässt sich auf die mit definierter Feuchte und Salzgehalt präparierten Beton-Probekörper auflegen. Die Radarmessungen lassen sich dann auf der Asphaltplatte durchführen.

Bild 82 zeigt den experimentellen Aufbau. Es wurden ähnliche Betonzylinder mit $w/z = 0.7$ (Durchmesser 150 mm, Höhe 68 mm) wie bei den in Kap. 5.3 beschriebenen Messungen ohne Asphalt ver-

wendet. Die Zylinder wurden eine Woche im Exsiccator evakuiert. Einer (Nr. 15) wurde mit Leitungswasser, der andere (Nr. 18) mit Salzwasser geflutet. Der Zylinder Nr. 15 wies eine Maximalfeuchte von 21 Vol.% auf. Die Maximalfeuchte von Zylinder Nr. 18 betrug 11.6 Vol.%, der Salzgehalt 0.82 M.%. Die Betonzylinder wurden in den PVC-Rahmen eingesetzt, so dass sich der 12 mm-Bügel direkt unter dem Betonzylinder befand. Dann wurde die Anordnung mit der Asphaltplatte abgedeckt. Die Radar-Messung wurde durch Scannen über den Asphalt durchgeführt.



Bild 82. Foto der Messanordnung für Betonzylinder mit Asphalt-Deckplatte. Die Radarwellen durchdringen die Asphaltdeckplatte und den Betonzylinder und werden am darunterliegenden Bewehrungsbügel reflektiert.

5.4.2 Radar-Messungen

Im Falle einer Betonüberdeckung erhält man mehrere Reflektionskomponenten der Radarwelle. Der erste Peak entsteht durch Reflektion an der Asphaltoberfläche, der zweite an der Grenzfläche Asphalt-Beton. Der dritte, für unsere Messung relevante Peak kommt durch Reflektion des Radarpulses am Stahlbügel zustande, vgl. Bild 23.

In der Praxis tritt das Problem auf, dass im allgemeinen weder die genaue Dicke z_1 des Asphalt noch seine dielektrischen Materialparameter, ϵ_1 und $\tan \delta_1$, bekannt sind. Natürlich besteht die Möglichkeit, diese Parameter über unabhängige Methoden zu ermitteln, z.B. eine Messung mit dem dielektrischen Mikrowellen-Resonator auf der Asphalt-Oberfläche zur Bestimmung von ϵ_1 und $\tan \delta_1$ und eine Impact-Echo-Messung der Asphaltstärke. Dies ist jedoch mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden.

Daher wurde für die Auswertung unserer Messungen der folgende vereinfachte Ansatz gewählt: Es wird angenommen, dass der Asphalt die gleichen

dielektrischen Materialparameter wie der Beton aufweist. In diesem Falle können einfach die Formeln [47] und [39] zur Berechnung einer effektiven komplexen Dielektrizitätszahl verwendet werden. Diese Annahme ist sicher nicht richtig, das lässt sich schon wegen des Vorhandenseins eines zweiten Rückstreupeaks im Radargramm sagen. Dennoch wird man eine qualitative Aussage über den Feuchte- und Salzgehalt des Beton erhalten. Die aus der Laufzeit und der Amplitude berechnete komplexe DK ist in Bild 83 und Bild 84 aufgetragen. Man erkennt, dass der salzhaltige Beton erwartungsgemäß größere DK-Werte aufweist.

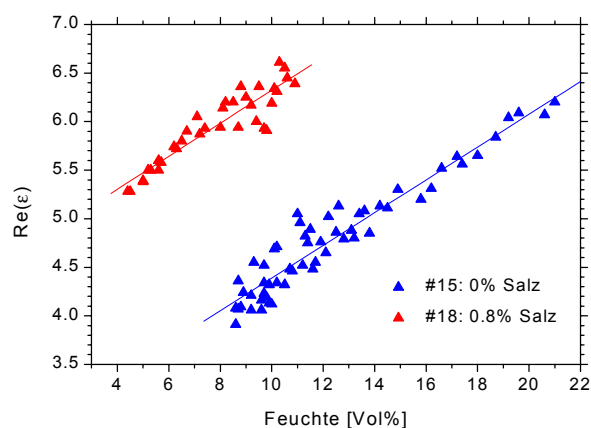


Bild 83. Realteil der gemessenen effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als Funktion der Feuchte für verschiedene Salzgehalte, ermittelt aus den Radarmessungen durch die überdeckende Asphaltsschicht.

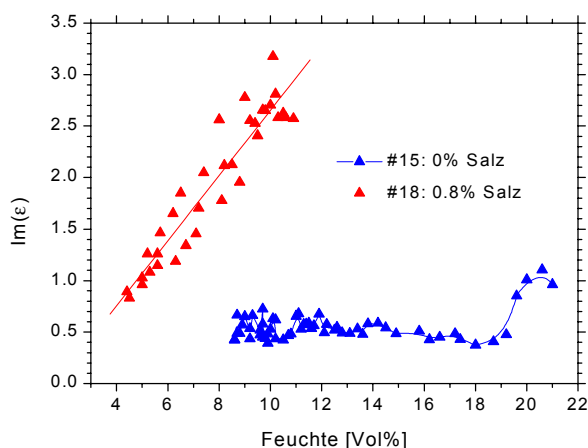


Bild 84. Imaginärteil der gemessenen effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als Funktion der Feuchte für verschiedene Salzgehalte, ermittelt aus den Radarmessungen durch die überdeckende Asphaltsschicht.

Trägt man die Messwerte für Real- und Imaginärteil unter Verwendung der Feuchte als Parameter

in der komplexen Ebene auf, so erhält man die Darstellung gemäß Bild 85. Man erkennt eine qualitativ gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten nach den Formeln von Schlemm [35].

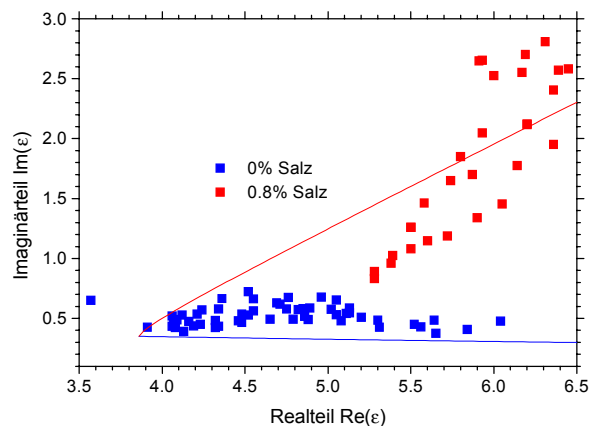


Bild 85. Parametrische Darstellung der mit Radar durch die überdeckende Asphaltsschicht gemessenen effektiven Dielektrizitätszahl des Beton in der komplexen Ebene. Blaue Quadrate – 0 % Salz, rote Quadrate – 0.8 % Salz, jeweils für verschiedene Feuchtegehalte. Die Linien markieren die berechnete effektive Dielektrizitätszahl des Beton unter Verwendung der Materialparameter für 2.45 GHz nach Schlemm [35].

5.4.3 Fazit

Im Laborexperiment konnte gezeigt werden, dass sich das Radar-Magnet-Verfahren prinzipiell geeignet ist, um den Feuchte- und den Salzgehalt von Beton durch eine 8 cm starke Asphaltdecke hindurch zu bestimmen. Im wesentlichen lässt sich die Feuchte aus der Radar-Laufzeit, die Durchsalzung aus der Radar-Amplitude ableiten. In der Praxis auf dem Bauwerk werden die Resultate allerdings von vielen Einflussgrößen abhängen, z.B. variable Dicke und Materialeigenschaften des Asphalt. Daher wird erwartet, dass die Genauigkeit des Verfahrens bei der Messung durch Asphalt zurückgeht.

6 Messungen auf Bauwerken

Um das Radar-Magnet-Verfahren und den Messaufbau des Radar-Magnet-Wagens zu testen, wurden Messungen auf zwei Autobahnbrücken durchgeführt. Die Messungen fanden Ende September 2005 auf der Talbrücke Uttrichshausen und auf der Döllbachtalbrücke im Zuge der Autobahn A7 nahe Fulda statt. Gemessen wurde jeweils auf den Teilbauwerken Fahrtrichtung Süden auf einem ca. 3 m breiten Streifen am rechten Fahrbahnrand. Auf beiden Brücken war der Asphaltbelag in größeren Feldern abgefräst, so dass dort Messungen direkt auf der Betonoberfläche durchgeführt werden konnten. In einigen nichtabgefrästen Bereichen wurden auch Messungen auf der Asphaltoberfläche durchgeführt, um zu überprüfen, ob eine Radar-Magnet-Messung des Chloridgehalts auch durch die Asphaltdecke hindurch möglich ist.

6.1 Talbrücke Uttrichshausen

Auf der Talbrücke Uttrichshausen, Teilbauwerk Fahrtrichtung Süden wurden am 26.09.2005 zwei Felder der Längen 40 m und 80 m gemessen, in denen der Asphalt entfernt worden war (Bild 86). Die Felder wurden in drei parallelen Scans in Fahrtrichtung durchgeführt. Der Abstand zwischen den Scanspuren betrug etwa 70 cm.

Die Messungen auf dieser Brücke wurden in 10 m-Abschnitten mit einer Vorschubgeschwindigkeit von nur ca. 1 km/h durchgeführt, um zu verhindern, dass es zu Datenverlusten kam.

Die Auswertung der Magnetfeldmessungen erfolgte mit dem Delphi-Mess- und Auswerteprogramm, vgl. Kap. 3.3. Das Programm ermittelt die zweite bzw. dritte Ableitung der Magnetfeldkomponenten B_z bzw. B_x nach der Scankoordinate x durch schrittweise numerische Differentiation und Glättung mittels symmetrischer, phasentreuer FIR-Filter. Die Tiefe der Bewehrungsbügel wird dann mit Gl. (16) berechnet. Die Radardatenauswertung erfolgt teilweise automatisiert mit der Software zur Identifikation der Scheitelpunkte der Reflektionshyperbeln, Kap. 3.2.3. Die Magnet- und die Radardaten werden anschließend auf Übereinstimmung ihrer Peakpositionen untersucht. Bei Übereinstimmung wird dann an jedem Bügelort unter Hinzunahme der Radar-Laufzeit und Reflektionsamplitude die komplexe Dielektrizitätszahl des Beton ermittelt. Daraus lässt sich über die Kalibrationsdiagramme Bild 81 und Bild 80 eindeutig die Feuchte und der Salzgehalt des Beton ableiten.

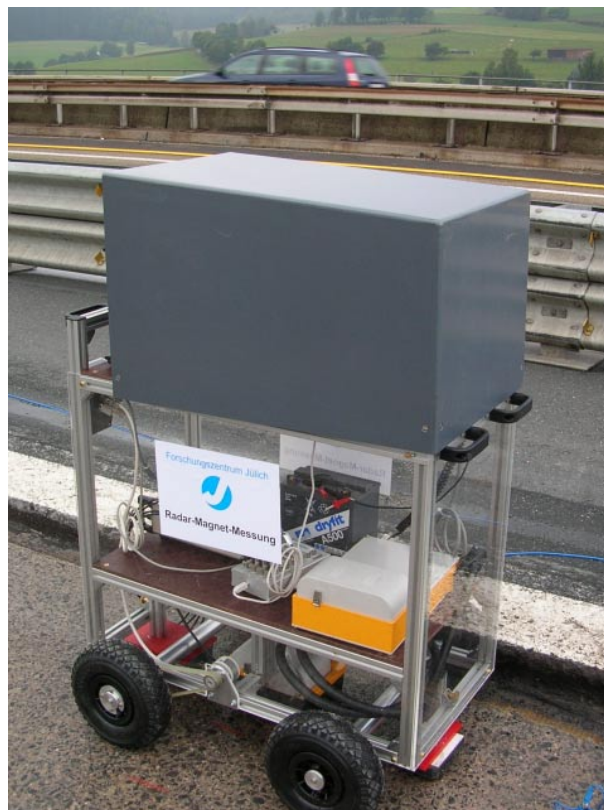


Bild 86. Der Radar-Magnet-Messwagen im Einsatz auf der Talbrücke Uttrichshausen.

6.2 Döllbachtalbrücke

Aufgrund der Erfahrungen bei der ersten Brückenmessung wurde das Delphi-Programm zur Aufnahme der Magnetdaten und zur Umrechnung auf äquidistante Datensätze modifiziert, um eine schnellere Messung zu ermöglichen. Am 05.10.2005 wurde der Radar-Magnet-Wagen mit verbesserter Software für die Magnetdatenaufzeichnung und Auswertung auf der Döllbachtalbrücke, Teilbauwerk Fahrtrichtung Süden erprobt, vgl. Bild 87. Die verbesserte Datenaufzeichnung gestattete eine Vorschubgeschwindigkeit von ca. 3 km/h.

Es wurden sowohl Messungen durch den Asphaltbelag hindurch als auch auf freigelegter Betonoberfläche durchgeführt. Ein 90 m langes Feld ohne Asphaltbelag wurde in drei parallelen Scans in Fahrtrichtung mit einem Abstand von etwa 70 cm zwischen den Scanspuren vermessen. Parallel dazu wurde eine weitere Spur von 50 m Länge durch den Asphalt hindurch gemessen.



Bild 87. Durchführung der Messung mit dem Radar-Magnet-Messwagen auf der Döllbachtalbrücke.

Als Beispiel zeigt Bild 88 die gemessenen magnetischen Daten und Radargramme eines 9 m langen Abschnitts der Döllbachtalbrücke. In diesem Abschnitt wurde die Messung direkt auf der Betonoberfläche durchgeführt. Dargestellt sind die mit Radar gefundenen Bügelorte, die zugehörigen Radar-Laufzeiten, die aus der Magnetfeldmessung ermittelten Bügeltiefen und die sich ergebenden beiden Komponenten der komplexen Dielektrizitätskonstante des Beton.

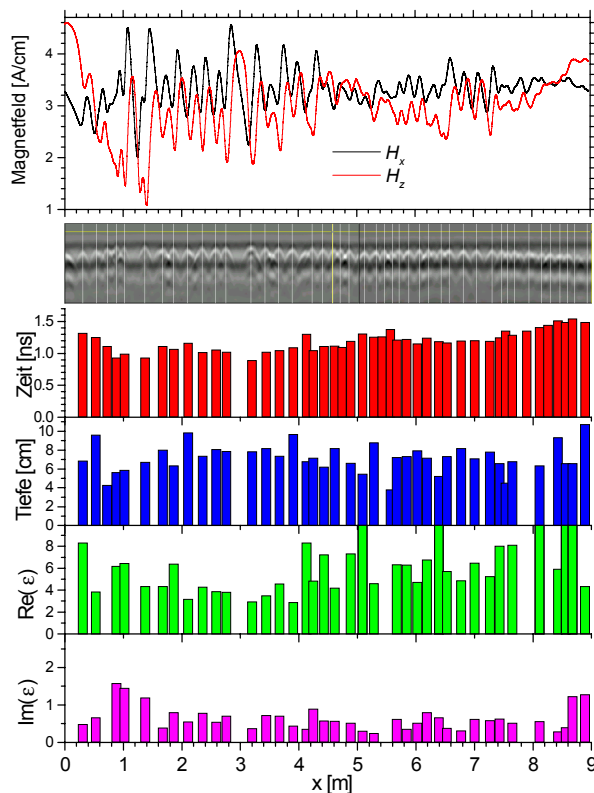


Bild 88. Ergebnisse der Radar-Magnet-Messung eines 9 m-Abschnitts der Döllbachtalbrücke. Der obere Graph zeigt die magnetische Messung, darunter ist der Radar B-Scan abgebildet.

det. Die vertikalen weißen Linien markieren die Positionen der Bügel gemäß unserer automatisierten Radar-Analyse. Die roten Säulen bezeichnen die gemessene Radar-Reflektionszeit von den Bügeln, die blauen Säulen die aus der Magnetfeldmessung gemäß (16) berechnete Tiefe der Bügel. Die grünen und die magentafarbenen Säulen stellen den Real- und den Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton dar, berechnet nach Gl. (39) and (47).

Man erkennt einige Indikationen mit erhöhtem Realteil der DK bei $x = 5 \text{ m}$, 6.5 m und $8 - 9 \text{ m}$, die auf durchfeuchtete Bereiche hindeuten. Bei $x = 1 \text{ m}$ und bei 8.8 m sind Bereiche mit signifikant erhöhtem Imaginärteil der DK zu identifizieren. Sie deuten auf einen erhöhten Salzgehalt hin.

Die beiden folgenden Abbildungen, Bild 89 und Bild 90, zeigen die derart ermittelten Werte für Real- und Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton für die zwei ersten Messfelder. Die Messwerte wurden jeweils als farbige Quadrate den Querbügel-Indikationen in einer kartographischen Darstellung der Messfelder überlagert. An einigen wenigen Positionen wurden die Salzgehalte durch die Laboranalyse von Bohrproben verifiziert. Die Laborresultate zur Salzbelastung sind zum Vergleich als Kreise eingezeichnet.

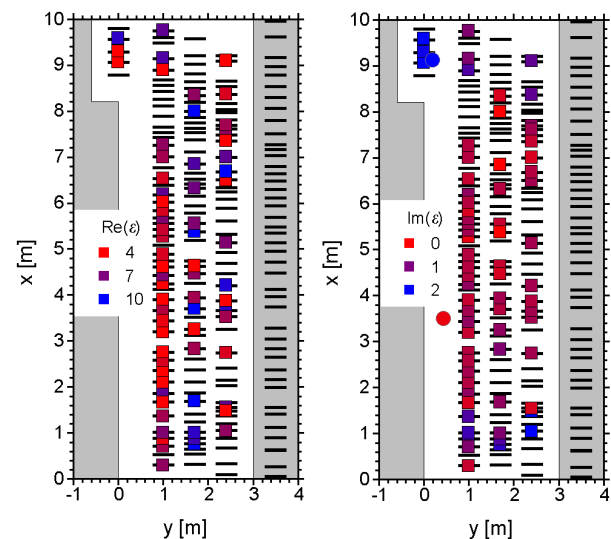


Bild 89. Ergebnisse der Radar-Magnet-Messung der Döllbachtalbrücke im Abschnitt $x = 0 - 10 \text{ m}$. Der abgefräste Bereich ist weiß hinterlegt, der asphaltierte Bereich grau. Die dicken schwarzen horizontalen Linien markieren die mit Radar gefundenen Positionen der Querbügel. Sofern die Magnetdaten an der gleichen Position eine auswertbare Tiefeninformation aufwiesen, wurde unter Verwendung der gemessenen Radar-Laufzeit der Realteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton berechnet und als quadratisches Symbol im linken Diagramm eingetragen. Rechts ist der aus dem gemessenen Radar-Reflektionskoeffizienten berechnete Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als quadratisches Symbol dargestellt. Zum Vergleich wurden die im Labor analysierten Salzgehalte von Bohrproben als Kreise eingetragen, dabei ist 0% - rot, 1% - violett und 2% - blau.

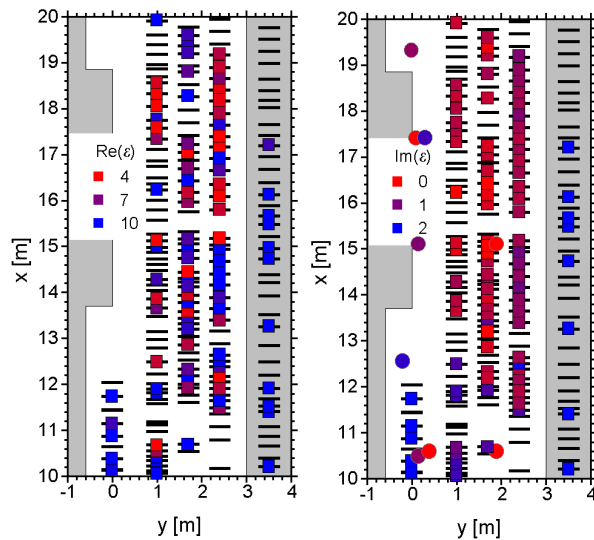


Bild 90. Ergebnisse der Radar-Magnet-Messung der Döllbachtalbrücke im Abschnitt $x = 10 - 20$ m. Die dicken schwarzen horizontalen Linien markieren die mit Radar gefundenen Positionen der Querbügel. Links ist der Realteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als quadratisches Symbol eingetragen. Rechts ist der Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl des Beton als quadratisches Symbol dargestellt. Zum Vergleich wurden die im Labor analysierten Salzgehalte von Bohrproben als Kreise eingetragen, dabei ist 0% - rot, 1% - violett und 2% - blau.

Man erkennt durchweg eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen hohen Imaginärteil-Indikationen der Radar-Magnet-Messung und hohen Salzgehalten der Bohrproben. Leider wurden die Bohrproben oft an Positionen genommen, die von den Orten der Radar-Magnet-Messung abweichen, so dass die Abweichungen in manchen Bereichen möglicherweise auf Konzentrationsgradienten zurückzuführen sind.

6.3 Fazit

Der Radar-Magnet-Wagen funktionierte zuverlässig auf beiden Brücken. Die Radar-Laufzeitmessung und die magnetische Tiefenbestimmung wurden gleichzeitig und unabhängig durchgeführt. In den meisten Fällen wurde eine Übereinstimmung zwischen den mit Radar und den magnetisch bestimmten Bügelpositionen gefunden. Die Magnetfelddaten zeigten allerdings systematisch mehr Peakindikationen an als aufgrund der Radardaten zu erwarten war. Diese zusätzlichen Magnetpeaks lassen sich durch eine ungleichmäßige Magnetisierung der Bügel, durch Effekte der Längsbewehrung oder durch Zusatzeisen im Beton erklären. Für die Auswertung wurden nur Peaks verwendet, die ein eindeutige Indikation an den gleichen Positionen aufwiesen.

Die Messungen haben gezeigt, dass Feuchte und Salzgehalt von Beton sogar durch eine Asphalt-schicht hindurch bestimmt werden können, sofern die Bewehrung nicht zu dicht liegt. Wie die Laboruntersuchungen des Magnetverfahrens (Kap. 3.1) gezeigt haben, sollte für eine zuverlässige Bestimmung der Tiefe der Abstand der Bewehrungs-eisen mindestens das Doppelte der Überdeckung betragen.

Der Radar-Magnet-Messwagen hat sich bei diesen beiden Erprobungen als grundsätzlich praxistauglich erwiesen. Er steht für Bauwerksmessungen zur Verfügung. Allerdings ist die Handhabung wegen des Zwei-Rechner-Betriebs und noch relativ umständlich. Die Datenauswertung erfordert noch eine umfangreiche manuelle Nacharbeit beim Abgleich der Radar- und Magnet-Indikationen.

Bei zukünftigen Bauwerksmessungen sollte darauf geachtet werden, dass Bohrproben an genau den Stellen genommen werden, an denen die Radar-Magnet-Messung durchgeführt wird. Ferner sollte auch der Feuchtegehalt des Beton anhand von Proben kontrolliert werden.

Es erscheint sinnvoll, den Aufbau und die Software des Radar-Magnet-Wagens weiterzuentwickeln, um eine verbesserte Steuerungsplattform zur einfachen und zuverlässigen Handhabbarkeit unter Baustellenbedingungen zu realisieren und um eine automatisierte On-line-Auswertung der Radar- und Magnetmessung zu erhalten. Die Vereinheitlichung der Auswertesoftware sollte es ermöglichen, sehr einfach und schnell eine Kartographierung der komplexen Dielektrizitätskonstante des Beton auf der abgescannten Fahrbahn vorzunehmen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsauftrags wurden Entwicklungs- und Erprobungsarbeiten zur Bereitstellung eines Mess-Systems getätigt, um durch die Kombination von Bodenradar- und Gleichfeldmagnetik-Sensorsystemen eine zerstörungsfreie, schnelle, zuverlässige und kostenminimale On-Line-Inspektion von Brückenfahrbahnplatten aus Beton zu ermöglichen. Es wurde ein Magnetfeld-Messkopf und ein Auswerteverfahren zur Bestimmung der Tiefe von Bewehrungsstählen entwickelt, aufgebaut und erprobt. Die Auswerte-Software wurde zur automatisierten Radarmessung und Laufzeitbestimmung zu diesen Bewehrungsstählen weiterentwickelt. Das Verfahren wurde am Chlorid-Probekörper der BAST erprobt und die grundsätzliche Funktionalität demonstriert.

Für eine unabhängige Bestimmung des Salzgehalts und der Feuchte von Beton ist es erforderlich, die vollständige komplexe Dielektrizitätskonstante (DK) zu kennen. Es wurde gezeigt, dass es mit der vorgeschlagenen Methode der Radar-Reflektion und der magnetischen Tiefenbestimmung im Prinzip möglich ist, sowohl den Realteil als auch den Imaginärteil der effektiven Dielektrizitätszahl ϵ_r von bewehrtem Beton zu bestimmen. Der Realteil der DK wird aus der Laufzeitanalyse der Radar-Reflektion unter Verwendung der magnetisch bestimmten Tiefe bestimmt. Der Imaginärteil wird mittels Analyse der reflektierten Radaramplitude gewonnen, er dient auch zur iterativen Korrektur des Realteils. Der Realteil der DK liefert den Feuchtegehalt des Beton. Bei hinreichender Feuchte ($\geq 5\%$) lässt sich dann der Salzgehalt aus dem Imaginärteil ableiten.

Zusätzlich wurde ein alternatives Verfahren zur zerstörungsfreien Feuchte- und Salzgehaltsbestimmung entwickelt, das auf der Beobachtung der Verstimmung und Dämpfung von Hochgüte-Mikrowellen-Resonatoren beruht. Messungen an Kalksandsteinen mit variabler Feuchte und Salzgehalt wurden durchgeführt und die Messergebnisse durch vergleichende Simulationsrechnungen nach der Finite-Differenzen-Methode verifiziert. Für verschiedene Resonatortypen wurden Kalibrationsdiagramme und analytische Approximationen ermittelt, die es ermöglichen, Feuchte und Salzgehalt unabhängig voneinander zu bestimmen. Dieses Verfahren eignet sich gut zur zerstörungsfreien Messung der Feuchte und Durchsalzung von Baustoffen im oberflächennahen Bereich bis ca. 4 cm Tiefe und sollte zu einem praxistauglichen Messgerät für die Bauwerksinspektion weiterentwickelt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Messwagen entwickelt und aufgebaut, der einen Permanentmagneten, ein Radarsystem, einen magnetischen Messkopf sowie eine Wegerfassung mittels Drehgeber beinhaltet. Während der Prüfer den Messwagen von Hand über die Brückenfahrbahn rollt, erfolgt eine synchronisierte magnetische Tiefenbestimmung und eine Radar-Laufzeitmessung. Es wurden Auswerteroutinen entwickelt, mit deren Hilfe die Tiefe der Bewehrungsbügel aus den differenzierten Magnetfelddaten bestimmt wird. Die Tiefenbestimmung funktioniert gut, falls der Bügelabstand mindestens die zweifache Tiefe beträgt. Auch für die automatisierte Radardatenauswertung wurde eine Software zur Identifikation der Scheitelpunkte der Reflektionshyperbeln entwickelt. Die Magnet- und die Radardaten müssen anschließend auf Kongruenz der Peaks untersucht werden. Bei Übereinstimmung wird dann an jedem Bügelort unter Hinzunahme der Radar-Laufzeit und Reflektionsamplitude die komplexe Dielektrizitätszahl des Beton ermittelt. Daraus lässt sich eindeutig die Feuchte und der Salzgehalt ableiten.

Der Radar-Magnet-Messwagen wurde auf zwei Brückenbauwerken erfolgreich erprobt. In mehreren Messfeldern wurden auf über 600 Metern Länge Magnet- und Radardaten aufgezeichnet. Die bislang durchgeführte Auswertung hat eine gute Übereinstimmung von Radar- und Magnetdaten gezeigt. Die komplexe effektive Dielektrizitätskonstante konnte gut bestimmt werden.

Weitere Untersuchungen zur Verifikation der Ergebnisse der Radar-Magnet-Technik mit anderen zerstörungsfreien Methoden durch Analyse von Bohrproben sind erforderlich, um die Fehler des Verfahrens bei unterschiedlichen Bauwerksgegebenheiten abschätzen zu können. Insbesondere sind noch Untersuchungen nötig, um die Grenzen der Anwendbarkeit des Verfahrens auf asphaltbedeckten Beton auszuloten.

Der Aufbau und die Software des Radar-Magnet-Wagens sollte weiterentwickelt werden, um eine zuverlässige Handhabbarkeit unter Baustellenbedingungen zu realisieren und um eine automatisierte Kartographierung der komplexen Dielektrizitätskonstante des Beton auf der abgescannten Fahrbahn vorzunehmen.

Es wird erwartet, dass nach Abschluss dieser Weiterentwicklungsarbeiten ein Messfahrzeug zur Verfügung steht, das eine sehr einfache und sehr kostengünstige zerstörungsfreie Bestimmung der Feuchte und des Salzgehaltes von bewehrten Beton-Brückenplatten durch die Asphaltdecke hindurch ermöglicht.

Beteiligte Mitarbeiter

M. Banzet, C. Dang, N. Klein, D. Lomparski, D. Owsiejewicz, G. Panaitov, M. Schmidt, M. Schuster, T. Winkler, W. Wolf, Y. Zhang / ISG-2, FZ Jülich

G. Berthold, H. Löhner / BAST

Literatur

- [1] Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken (B3), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (1990).
- [2] R. Springenschmid, Anleitung zu Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton Heft 401; Hrsg: DAfStb, Berlin, S. 7-44 (1989).
- [3] W. Leschnik, Feuchtemessung an Baustoffen - Zwischen Klassik und Moderne, in: DGZfP (Hrsg.); Feuchtetag 99, BAM, Berlin, DGZfP-Berichtsband 69-CD, Vortrag H2 (1999).
- [4] G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser, ZfPBau-Kompendium, http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/welcome.html.
- [5] K. Kupfer, Materialfeuchtemessung, Renningen-Malmsheim: expert Verlag, Kontakt und Studium Band 513, 1997.
- [6] H.M. Künzel, K. Kießl, Ist Vakuumtrocknung günstiger als Konvektionstrocknung?, Bauphysik 12, 27-30 (1990).
- [7] P. Nischer, Die Wassergehaltsbestimmung von Betonzuschlägen und Beton mit der Karbidmethode, Zement und Beton 30 (2), S. 69-70 (1985).
- [8] P. Häupl, H. Stopp, Lambda-Nadelsonde, Bauinformation 28 (6), 6-7 (1985).
- [9] H. Marquardt, Feuchtemessungen in nachträglich gedämmten Beton-Sandwichwänden, Bauphysik 15, 153-160 (1993).
- [10] W. Schwarzwald, H. Venzmer, Neue Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Ultraschallfeuchtemessung an Werkstoffen des Mauerwerks, Int. J. Restoration of Buildings and Monuments 1, 21-36 (1995).
- [11] Ch. Maierhofer, A. Brink, B. Hillemeier, C. Rieck, M. Röllig, H. Wiggenhauser, Struktur- und Feuchteuntersuchung in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie, Bauphysik 25 (1), S. 22-26 (2003).
- [12] K. Büscher, H. Wiggenhauser, Feuchtemessungen mit infrarotoptischen Methoden, in: DGZfP (Hrsg.); Feuchtetag 99, BAM, Berlin, DGZfP-Berichtsband 69-CD, Vortrag M2 (1999).
- [13] A. Kober, L. Mehlhorn, Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung. Teil 2: Erprobung der Meßvorrichtung und Ergebnisse, Bauphysik 16 (3), 81-85 (1994).
- [14] H. G. Henrich, Zerstörungsfreie Feuchtemessung mit der Neutronensonde, Consulting 7, S. 18 (1986).
- [15] J. Rant, J. Stade, Bestimmung der Feuchtigkeitsprofile in dicken Schichten von Baumaterialien mittels Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse, in: H. Wiggenhauser, H.S. Müller, N. Girlich (Hrsg.); Tagungsbericht Feuchtetag 1993, Berlin, DGZfP-Berichtsband 40, S. 34-43 (1993).
- [16] B. Wolter, U. Netzelmann, G. Dobmann, Zerstörungsfreie Bestimmung von Tiefenprofilen in Baustoffen mit Hilfe von Kernspinresonanz in Aufsatztechnik, in: H. Wiggenhauser, H. S. Müller (Hrsg.), Tagungsbericht Feuchtetag 1995, BAM, Berlin, S. 18-26 (1995).
- [17] M. Chouteau, S. Beaulieu, An Investigation on the application of the tomographic resistivity method to concrete structures in: Proc. 2nd Ann. Conf. on Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, Los Angeles, CA, April 15-19 (2002).
- [18] C. Arendt, Einsatzmöglichkeiten gängiger Feuchtemessgeräte unter Berücksichtigung von Salzeinflüssen, Feuchtetag '93, DGZfP-Berichtsband 40, S. 147-167 (1993).
- [19] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (2001).
- [20] R. Plagge, Bestimmung der Materialfeuchte mit Hilfe der Time Domain Reflektometrie, Feuchtetag '93, DGZfP-Berichtsband 40, S. 253-262 (1993).
- [21] M. Rudolph, D. Schaurich, H. Wiggenhauser, Feuchteprofilmessungen mit Mikrowellen in Mauerwerk, Feuchtetag '93, DGZfP-Berichtsband 40, S. 44-56 (1994).
- [22] C. Hauenschield, Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe für die Entwicklung von Feuchtemessverfahren, Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1999.
- [23] R. Herrmann, J. Sikora, S. Zaage, Feuchtemessung mit Mikrowellen-Resonatoren, Technisches Messen 64, 11 (1997).
- [24] Ch. Maierhofer, J. Wöstmann, Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high fre-

- quencies, NDT&E International 31, 259-263 (1998).
- [25] J. Krieger, M. Krause, H. Wiggenhauser, Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Heft B18, S. 24-56 (1998).
- [26] B. Illich, Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen nach Bewehrung und Fehlstellen mittels hochauflösendem Radar unter Anwendung unterschiedlicher Untersuchungskonzepte, Bericht der Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen, Karlsruhe (2000).
- [27] T. Funk, R. Kretz, T. Lindner, Zerstörungsfreie Untersuchung des Straßenaufbaus mit dem Impulsradar, Schriftenreihe der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung, Heft 40 (1996).
- [28] D. Daniels, Surface-Penetrating Radar, The Institution of Electrical Engineers, London (1996).
- [29] C. Maierhofer, S. Leipold, und J. Wöstmann: Strukturuntersuchungen in Beton mit dem Impulsradar, in: Fachtagung Bauwerksdiagnose, DGZfP-Berichtsband 66-CD, Vortrag 5 (1999).
- [30] B. Welz, Atomabsorptionsspektrometrie, Verlag Chemie, Weinheim, 3. Auflage, 1983.
- [31] M. Rommel, Anwendungsmöglichkeiten von ausgewählten atomspektroskopischen und nuklearen Methoden zur Konzentrationsbestimmung in der Bauwerksdiagnostik, Dissertation, TH Leipzig 1989.
- [32] A. Taffe, D. Schaurich, F. Weritz, H. Wiggenhauser, G. Wilsch, Ermittlung des Chloridgehalts von Betonproben mit laser-induzierter Breakdown Spektroskopie (LIBS), S. Gieler-Breßmer (Hrsg.), 1. Kolloquium Verkehrsbauten, Schwerpunkt Parkhäuser, Tagungshandbuch, tae-Esslingen (2004).
- [33] A. Rechsteiner, Grundlagen von Potentialmessungen an Stahlbetonbauten, in: W. Schwarz (Hrsg.), Korrosion von Bewehrungsstahl in Beton, WTA Schriftenreihe Heft 19, AEDIFICATIO Verlag GmbH Freiburg, Zürich, S. 31-50 (1999).
- [34] S. Kobayashi, Microwave attenuation in a wet layer of limestone, in: A. Kraszewski (Hrsg.), Microwave aquametry, IEEE Press, New York (1996).
- [35] U. Schlemm, Messung von Feuchte- und Salzprofilen mit Mikrowellen – Untersuchung von Störeinflüssen und Verbesserung der Messeigenschaften, Dissertation, TU Hamburg-Harburg (2003).
- [36] C. Flohrer, Messung der Betondeckung und Ortung der Bewehrung, in: Fachtagung Bauwerksdiagnose, DGZfP-Berichtsband 66-CD, Vortrag 4 (1999).
- [37] W. Ricken, G. Mehlhorn, Determining of the concrete thickness and the bar diameter in reinforcing concrete with a method of eddy current testing, Int. Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Vol.1, S. 197-204 (1995).
- [38] R. Neumann und G. Dobmann, Neue magnetische Gerätetechnik bei der Betondeckungsmessung, in: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Hrsg: G. Schickert, BAM, DGZfP, Berlin (1991).
- [39] G. Sawade und H.-J. Krause, Tiefenbestimmung der Querbügel aus Restfeldmessungen, interner Bericht (2002).
- [40] G. Sawade: Mobiles SQUID - Messsystem zur Bauwerksinspektion Teilvorhaben Magnetisierungsvorrichtung und Signalverarbeitung, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 13 N7249/3, 2001
- [41] A. Savitzky, M.J.E. Golay, Analytical Chemistry 36, 1583-1586 (1964).
- [42] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press, New York (1988).
- [43] H.-J. Krause, W. Wolf, W. Glaas, E. Zimmermann, M.I. Faley, G. Sawade, R. Matheus, G. Neudert, U. Gampe, J. Krieger, SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges, Physica C 368, 91-95 (2002).
- [44] RAMAC/GPR (1999). RAMAC/GPR, Operating Manual, MALÅ GeoScience, S-93070 Malå, Schweden.
- [45] D. Kajfez, P. Guillon, Dielectric Resonators, Artech House, Dedham, MA (1986).
- [46] T. Sokoll, A. Jacob, R. Geise, A compact network analyzer for resonant microwave sensors, 6th Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA 2005), Weimar, Vortrag 5-5, S. 222 – 230 (2005).

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kückler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck in Vorbereitung

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.