

Das Radar-Magnet-Betontest-Verfahren zur Bestimmung der Feuchte und des Chloridgehalts von Brückenfahrbahnplatten aus Beton

Hans-Joachim KRAUSE^{*}, Michael WILLMES^{**}, Gottfried SAWADE^{***},
Andreas KATHAGE^{****}, Martin FRIESE^{*****}

^{*} Peter-Grünberg-Institut (PGI-8), Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich
^{**} Zentrales Labor für Baustofftechnik, Bilfinger Berger SE,

Carl-Reiß-Platz 1-5, 68165 Mannheim

^{***} Materialprüfungsanstalt (MPA) Otto Graf Institut, Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

^{****} GeoHiRes International GmbH, Butenwall 56, 46325 Borken

^{*****} Bundesanstalt für Straßenwesen, Brüderstr. 53, 51427 Bergisch Gladbach

Kurzfassung. Das Radar-Magnet-Verfahren ermöglicht eine zerstörungsfreie Bestimmung der Betonfeuchte und des Salzgehalts. Mit einem Georadar wird die Laufzeit und Amplitude elektromagnetischer Wellen von der Fahrbahnoberfläche bis zur oberflächennahen Bewehrung bestimmt. Mit zunehmender Feuchte der durchlaufenen Materialien verlängert sich die Laufzeit der Gigahertz-Radarwellen; ein erhöhter Chloridgehalt äußert sich in zunehmender Dämpfung der Wellen. Die Asphalt- und Beton-Überdeckung der Bewehrungsstähle wird mit einer magnetischen Gleichfeld-Methode bestimmt, indem die Ableitungen zweier Komponenten des magnetischen Restfelds ermittelt werden. Die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätskonstante des Fahrbahnbelages und des Betons haben hierbei keinen Einfluß auf die Tiefenbestimmung der Bewehrung. Aus Radar-Laufzeit und statisch-magnetisch ermittelter Tiefe wird der Realteil der effektiven Dielektrizitätskonstante (DK) des überdeckenden Asphalts und Betons bestimmt. Der Imaginärteil wird aus dem gemessenen Reflexionskoeffizienten ermittelt. Mit Hilfe empirischer Kalibrationskurven leitet man daraus die Feuchte und den Salzgehalt des Betons ab. Das Verfahren eignet sich gut, um zerstörungs- und berührungsfrei große Flächen durch den Fahrbahnbelag und die Abdichtung hindurch auf potentiell geschädigte Bereiche hin zu überprüfen. Die so identifizierten Problemzonen können dann detailliert mit zerstörenden Verfahren untersucht werden. Ein Radar-Magnet-Messwagen wurde entwickelt und auf zwei Brückenbauwerken zur großflächigen Kartierung der effektiven komplexen DK des oberflächennahen Betons eingesetzt. Gegenwärtig wird an einer Verbesserung der Genauigkeit für den Fall großer Überdeckungen gearbeitet. Zur Charakterisierung im Labor werden gezielt mit bekannter Feuchte und Versalzung präparierte Beton-Probekörper verwendet. Die magnetische Tiefenbestimmung wird durch Korrektur auf Signalanteile benachbarter Stähle verbessert. Für die Radarmessung werden zur Verbesserung der Auflösung höherfrequente Antennen als bei den ersten Versuchen eingesetzt.

1. Einführung

Brückenfahrbahnplatten aus Beton können bei Mängeln am Belag und an der Abdichtung durch eindringende Feuchtigkeit geschädigt werden. Wenn Chloride mit dem Wasser in den Beton eindringen, kann es zu Korrosion der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder

kommen. Das Radar-Magnet-Verfahren [1,2] ermöglicht eine zerstörungsfreie Bestimmung der Betonfeuchte und des Salzgehalts von Beton-Brückenfahrbahnplatten durch eine Kombination einer Amplituden-Laufzeitmessung mit Georadar und einer statisch-magnetischen Tiefenbestimmung der Bewehrung. Das zerstörungsfreie Verfahren eignet sich gut, um große Flächen durch den Fahrbahnbelag und die Abdichtung hindurch auf mögliche Schäden hin zu überprüfen. Die so identifizierten Problemzonen können dann detailliert mit zerstörenden Verfahren untersucht werden.

2. Das Radar-Magnet-Verfahren

2.1. Dielektrische Eigenschaften von Beton

Das dielektrische Verhalten von Baustoffen wird stark durch ihren Wasser- und Salzgehalt beeinflusst. Man beschreibt die komplexe Dielektrizitätskonstante (DK) des Materials gemäß

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon'_r + i \varepsilon''_r) = \varepsilon_0 \varepsilon'_r (1 + i \tan \delta) \quad (1)$$

mit der reellen DK ε'_r und dem sogenannten Verlustwinkel $\tan \delta = \varepsilon''_r / \varepsilon'_r$. Dabei bezeichnet $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m die elektrische Feldkonstante. Die Dipoleigenschaften der Wassermoleküle bestimmen den Übergang des Realteils ε' vom statischen Grenzfall $\varepsilon_{st} \approx 80$ zum hochfrequenten Grenzfall $\varepsilon_\infty \approx 3,2$. In der Nähe der Relaxationsfrequenz weist der Imaginärteil ε'' eine breite Resonanzabsorptionsbande auf. In porösen Baustoffen ist das Wasser an den Porenwandungen physikalisch gebunden. Je fester diese Bindung ist, desto niedriger liegt die Resonanzfrequenz.

Schlemm [3] hat analytische Beziehungen für die Materialparameter ε' und $\tan \delta$ von Baustoffen angegeben und die Parameter für 2.45 GHz aus Fits an seine Resonator-Messungen verschiedener Baustoffe einschließlich Beton ermittelt. Abb. 1 zeigt die Dielektrizitätskonstante in der komplexen Ebene als Funktion der Feuchte und des Salzgehalts.

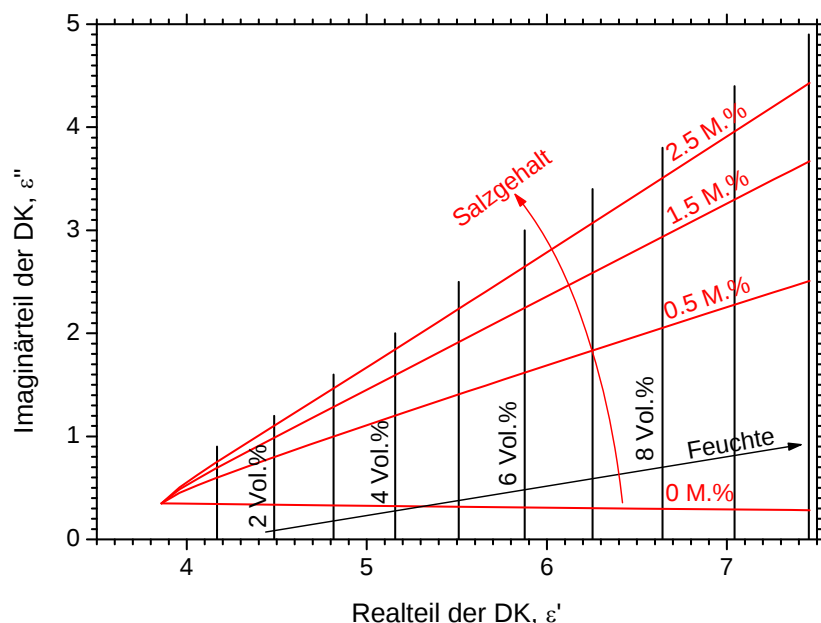


Abb. 1. Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante (DK) von Baustoffen bei 2.45 GHz als Funktion der Feuchte und des Salzgehalts, berechnet nach Schlemm [3] mit den dort angegebenen empirischen Formeln (5.2) und (5.11).

2.2. Physikalisches Prinzip des Radar-Magnet-Verfahrens

Das Radar-Magnet-Verfahren [1,2,4] basiert auf einer simultanen Radar-Messung der Amplitude und Laufzeit von Mikrowellen zu den oberflächennahen Bewehrungsseisen und einer statisch-magnetischen Messung der Tiefenlage dieser Bewehrung, vgl. Abb. 2. Mit dem Georadar wird die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen von der Fahrbahnoberfläche bis zur oberflächennahen Bewehrung bestimmt, die von den dielektrischen Eigenschaften der dazwischen befindlichen Materialien abhängt, vgl. Abb. 2 rechts.

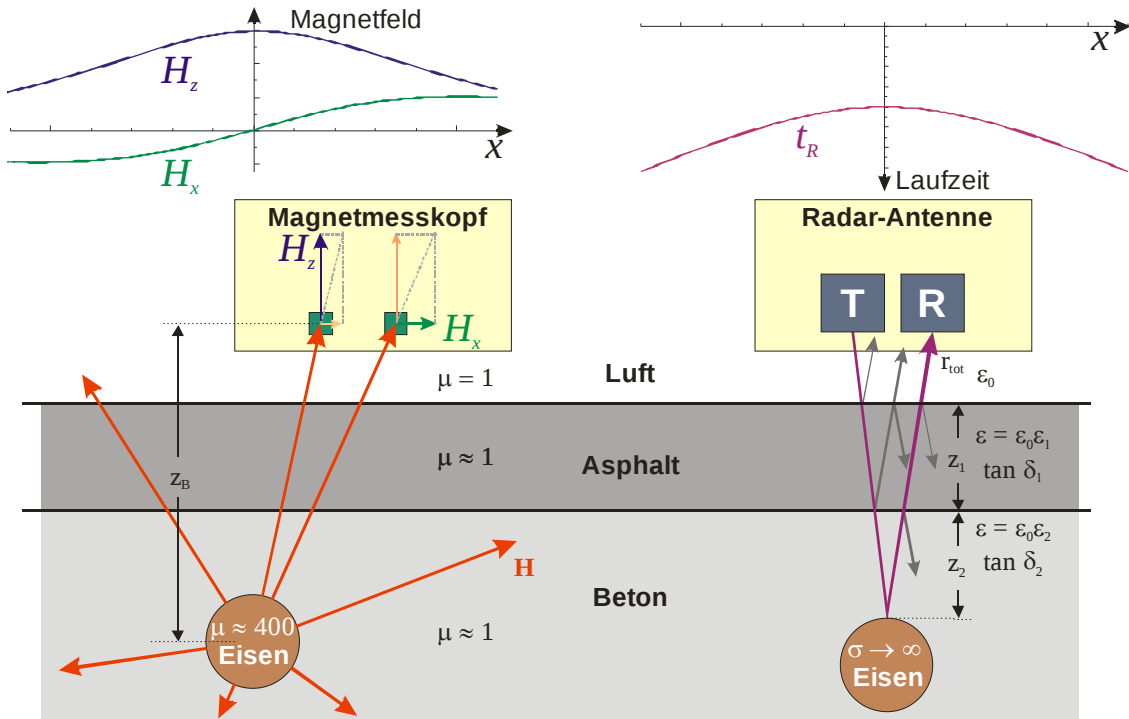


Abb. 2. Veranschaulichung der Radar-Reflexion an einem Metallobjekt (Bewehrungsstahl), das in ein dielektrisches Medium (Beton bzw. Asphalt) eingebettet ist.

Beim Scannen der Beton-Fahrbahnplatte mit einem Georadar liefern die quer zur Scanrichtung liegenden Bewehrungsstäbe die typischen Hyperbelreflexionen (Abb. 2, rechts oben). Sofern die Tiefenlage der Bewehrungsstäbe genau bekannt ist, kann aus den gemessenen Radar-Laufzeiten in den Scheitelpunkten der Hyperbeln die Geschwindigkeit der Radarwellen bestimmt werden [5]. Die Wellengeschwindigkeit hängt hauptsächlich vom Realteil der Dielektrizitätskonstante (DK) des Betons ab.

Nimmt man Beton und Asphalt als ein homogenes, dielektrisches, unmagnetisches Medium mit den Materialkonstanten $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ und $\mu = \mu_0$ und hinreichend kleinen Verlusten an, d.h., $\sigma \ll \omega \varepsilon$, so erhält man aus der Lösung der Maxwell'schen Gleichungen im Grenzfall ebener Wellen die folgenden beiden Beziehungen für den Realteil und den Imaginärteil der DK des Materials.

$$\sqrt{\varepsilon'_r} = \frac{ct_r}{2z_B} \left(1 - \frac{1}{8} \tan^2 \delta \right) \xrightarrow{\tan \delta \rightarrow 0} \frac{ct_r}{2z_B} \quad (2)$$

$$\tan \delta = \frac{c}{2\pi f z_B \sqrt{\varepsilon'_r}} \ln \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon'_r}} + 1 \right)^2 r_{tot} \frac{\sqrt{\varepsilon'_r}}{4} \right] \quad (3)$$

Dabei bezeichnet t_r die mit dem Radargerät gemessene Laufzeit der Radarwelle zum Reflektor und zurück, z ist der Laufweg, f ist die Frequenz der Radarwelle, $c = 2,998 \times 10^8$ m/s die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit und r_{tot} der gemessene Radar-Reflexionskoeffizient, d.h. das Verhältnis der reflektierten Radar-Amplitude zur eingestrahlten Amplitude. Bei bekannter Tiefe z_B des Bewehrungsstahls erhält man also aus der Laufzeit die Feuchte des überdeckenden Baustoffs und aus dem gemessenen Reflexionskoeffizienten den Imaginärteil und damit Information über seinen Chloridgehalt.

2.3 Magnetische Tiefenbestimmung

Voraussetzung für die Auswertung der Radarmessung ist die genaue Kenntnis der Tiefenlage der Bewehrungsstäbe. Sie wird durch eine Messung ihres remanenten Magnetfeldes nach Magnetisierung mittels eines Permanent- oder Elektromagneten bestimmt. Aus der Messung zweier Komponenten des remanenten magnetischen Feldes der Bewehrung ist es möglich, den Abstand von der Mitte des Bewehrungsseisens zu den Sensoren genau zu bestimmen. Diese quasi-statische Magnetfeldmessung ist völlig unabhängig von den dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Beton und des darüberliegenden Asphaltbelags. Abb. 3 zeigt die gemessenen Feldkomponenten H_x und H_z beim Scan über ein einzelnes Bewehrungsseisen als Funktion der Scankoordinate x .

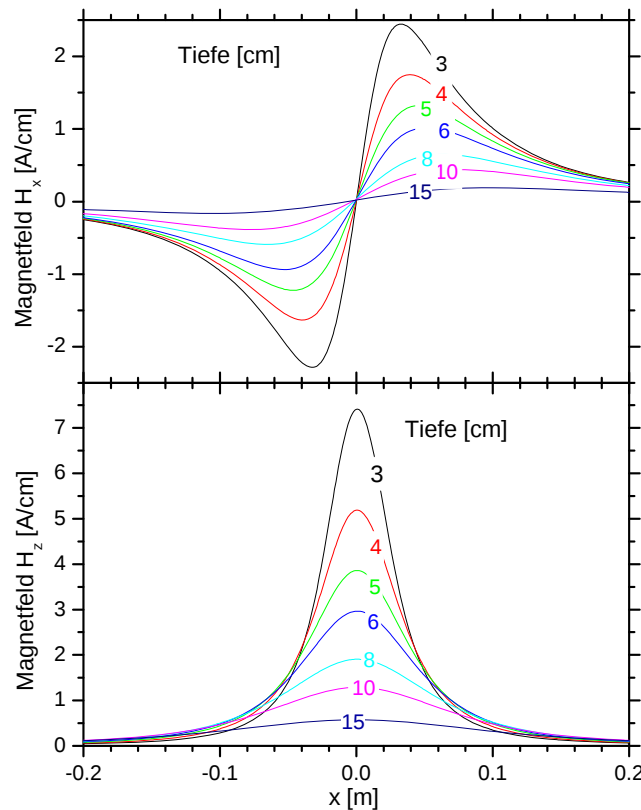


Abb. 3. Gemessene Magnetfeldkomponenten H_x und H_z des Restfeldes eines einzelnen Bewehrungsseisens bei $x = 0$ m als Funktion der Scankoordinate x für verschiedene Abstände (Tiefen) z .

Auf der Grundlage der Magnetostatik können unter den Voraussetzungen, dass die Querbewehrung orthogonal zur Scanrichtung angeordnet ist (siehe Bild 2 links) und nur entlang ihrer Längsachse magnetisiert ist, einfache Gleichungen zur Bestimmung der Tiefe z_B abgeleitet werden. Die fundamentale Gleichung (4) beschreibt die Tiefe als Quotient von Ableitungen der beiden Feldkomponenten. Die zugrundegelegten Beziehungen, die mathematische Herleitung und alle wichtige Formeln finden sich in Ref. [1].

$$z_B = \left| \frac{\frac{\partial^{2k}}{\partial x^{2k}} H_z(x_B)}{\frac{\partial^{2k+1}}{\partial x^{2k+1}} H_x(x_B)} \right|, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Durch die Verwendung höherer Ableitungen können Einflüsse der benachbarten Bewehrungsseisen sowie vorhandener statischer magnetischer Offsetfelder aus der Umgebung reduziert werden. Allerdings nimmt mit steigender Ordnung die Anforderung an die Qualität der Messungen zu. Unter den üblicherweise auf einem Bauwerk zu findenden Störeinflüssen eignet sich Gleichung (4) mit $k = 1$ besonders gut für die Bestimmung der Tiefe [1,2]. Sie wurde bei der Analyse der Magnetdaten verwendet.

3. Aufbau des Radar-Magnet-Wagens

Für die magnetischen Messungen wurde ein Messkopf aus vier GMR-Magnetometern aufgebaut. Zwei Magnetometer messen die Feldkomponenten H_x , die zwei anderen die Komponente H_z . Um eine sehr gute Linearität und Temperaturstabilität zu erreichen, werden die Magnetometer als Nulldetektoren in einem Konstantfeldmodus betrieben [1].

Die magnetischen Messkomponenten und das Georadar-System sind auf einem Handwagen montiert. Abb. 4 zeigt den schematischen Aufbau und die elektrische Verdrahtung des Radar-Magnet-Messwagens [1,2]. Auf einer Radnabe ist ein Zahnrad aufgeflanscht, dass über einen Zahnriemen den Drehgeber zur Positionsbestimmung treibt. Die Georadar-Impulsmessung wird ortsgesteuert über den Drehgeber synchronisiert. Die gemessenen Georadar-Reflexionssignale eines Linienscans werden als B-Scan wiedergegeben, das einem Orts-/Laufzeitprofil entlang der Fahrt entspricht. Die Ausgangssignale der vier Magnetometer-Sensoren werden über ein USB-Datenaufnahme-Modul digitalisiert. Die Drehgebersignale werden dem Impulsradarcontroller zur Triggerung zugeführt, zur Synchronisation der Magnetmessung auch über digitale Eingänge des USB-Datenaufnahmемoduls gelesen, und zusätzlich mit einem skalierbaren Zählermodul dem Operateur als Weganzeige in Metern dargestellt.

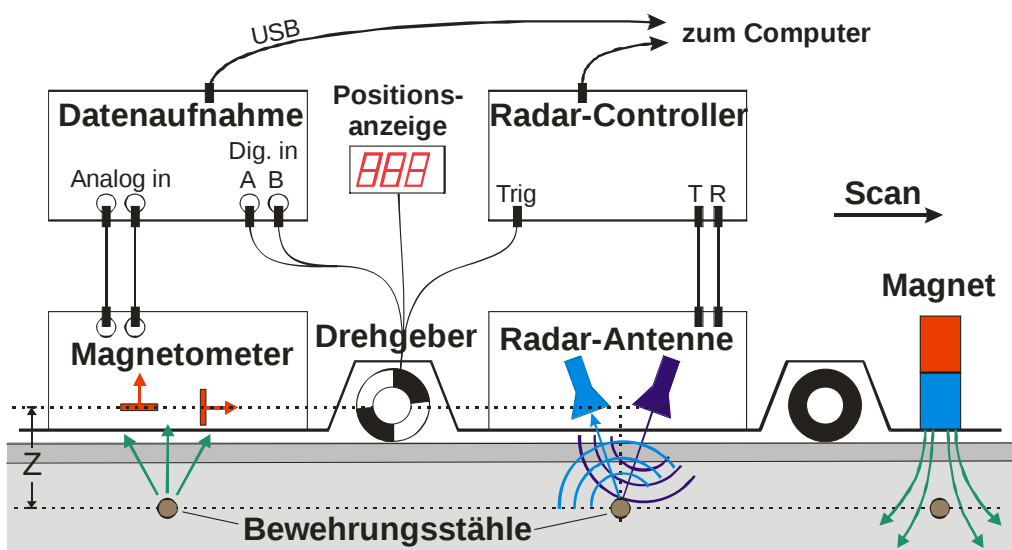


Abb. 4. Prinzipskizze des Radar-Magnet-Messwagens.

4. Bauwerksmessungen

Das Radar-Magnet-Verfahren wurde bereits auf Brückenbauwerken erprobt (Abb. 5). Auf der Schüpfbachtalbrücke wurden zunächst Radar-Magnet-Messungen auf dem vorhandenen Fahrbahnbelag auf zwei Teilflächen mit einer Gesamtgröße von ca. 230 m² getätigt. Durch Vergleich der Georadar-Signallaufzeiten zur oberen Bewehrungslage mit der magnetisch gemessenen Tiefe der Bewehrung wurde die effektive komplexe DK des Betons und des Asphalts über den Bewehrungsseisen bestimmt. Nach Entfernung des Fahrbahnbelages wurden die Radar-Magnet-Messungen auf der freigelegten Betonfläche des Überbaus wiederholt. Die Ergebnisse der Feuchte- und Chloridbestimmung wurden mit den Ergebnissen auf Asphalt überlagert und verglichen.



Abb. 5. Radar-Magnet-Messung auf der Schüpfbachtalbrücke.

Die Messungen (Abb. 6) haben gezeigt, dass Bereiche mit erhöhtem Feuchte- und Salzgehalt bei der Messung auf der abgefrästen Betonfläche zuverlässig bestimmt werden konnten. Bei den Messungen durch die Asphaltschicht hindurch war die Messwertstreuung allerdings deutlich größer als im nicht überdeckten Fall. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Fehler in der magnetischen Tiefenbestimmung sehr groß wird, wenn das Verhältnis aus Bewehrungsabstand und Tiefe kleiner als 2 ist. Als Ergebnis der Messungen erhält man eine kartografische Darstellung der effektiven DK des Messfeldes (Abb. 7).

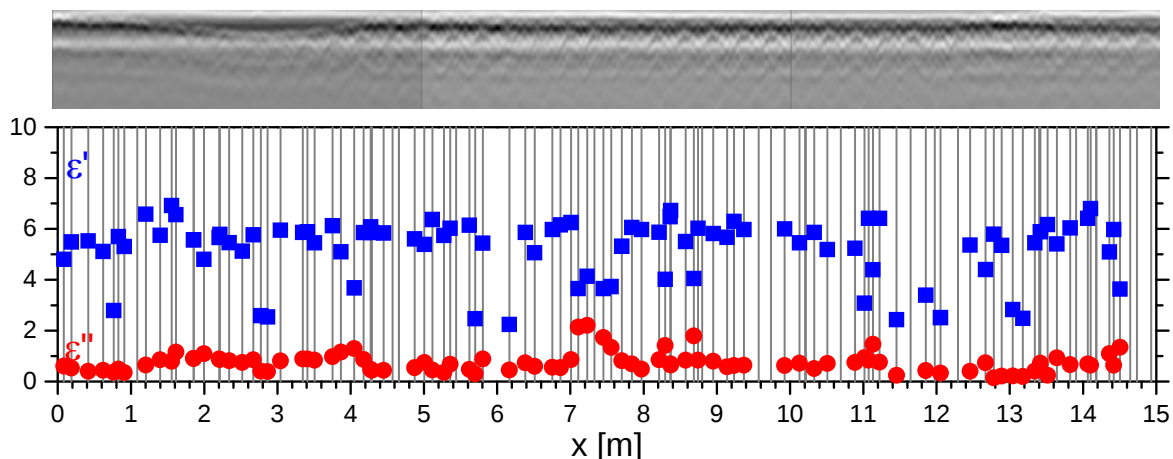


Abb. 6. Exemplarische Darstellung eines auf der Schüpfbachtalbrücke gemessenen Linienscans und die Auswertung. Oben: Mit 1 GHz RAMAC/GPR von MALÅ Geo-Science gemessene Radargramme, unten: aus Georadardaten ermittelte Positionen der Bewehrung (graue Linien), aus den Magnetdaten ermittelter Realteil (blaue Quadrate) und Imaginärteil (rote Kreise) der effektiven Dielektrizitätskonstante von Asphalt und Beton.

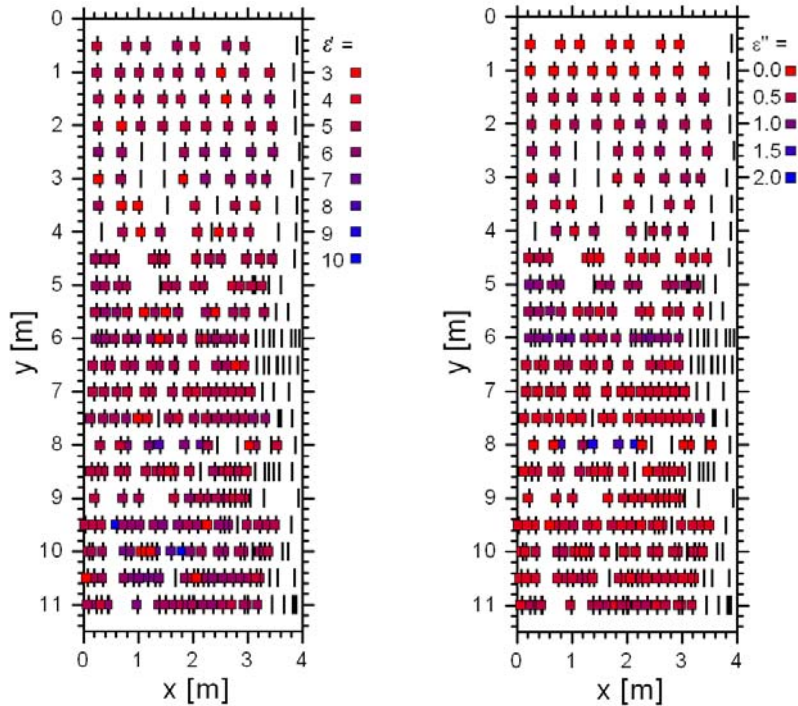


Abb. 7. Ergebnisse der Radar-Magnet-Messung auf der Asphalt-Fahrbahnoberfläche in einem Messfeld der Schüpfbachtalbrücke. Die dicken schwarzen Linien markieren die mit Georadar gefundenen Positionen der Bewehrungsstäbe. Die farbigen Quadrate bezeichnen den Wert der effektiven Dielektrizitätskonstante des Betons, und zwar links: Realteil, rechts: Imaginärteil.

5. Aktuelle Arbeiten zur Verbesserung der Radar-Magnet-Messungen

Im Rahmen des BMV-geförderten Forschungsauftrags 15.0486/2009/DRB der BAST wird das Radar-Magnet-Verfahren weiterentwickelt, um eine zuverlässige Bestimmung der Feuchte und des Salzgehaltes des Betons auch durch eine Fahrbahndecke aus Asphalt hindurch zu realisieren. Das Versuchsprogramm beinhaltet die Herstellung praxisnaher Betonprüfkörper mit wohldefinierter Feuchte und Chloridgehalt unter Variation der Betondeckung, Bewehrungsabstände, Stabdurchmesser und Belagdicke. Die magnetische Tiefenbestimmung wird durch Optimierung der Magnetisierungsführung, der Messung und der Auswertung durch neue Ansätze unter Berücksichtigung der Effekte benachbarter Stähle verbessert.

Dazu wird ein neuer Berechnungs-Ansatz einer „magnetischen Störungstheorie“ untersucht, der die Magnetfelder benachbarter Quereisen berücksichtigt. Zunächst wird wie bisher eine lokale Bestimmung der Tiefe aus den zwei Gradientenkomponenten des horizontalen und des vertikalen Feldes durchgeführt. Dann wird das Feld jedes Bewehrungsseisens um die Magnetfelder der beiden nächsten Nachbarn korrigiert (Abb. 8). In den Berechnungen führt dies zum Einsatz der folgenden neuen Formel für die Tiefenbestimmung:

$$z_{\text{kor}}(x_i) = \frac{3B''_{z,\text{kor}}(x_i)}{B'''_{x,\text{kor}}(x_i)} = 3 \cdot \frac{B''_{z,0}(x_i) - B''_{z,\text{id}}(x_i - x_{i-1}, z_{i-1}) - B''_{z,\text{id}}(x_i - x_{i+1}, z_{i+1})}{B'''_{x,\text{kor}}(x_i) - B'''_{x,\text{id}}(x_i - x_{i-1}, z_{i-1}) - B'''_{x,\text{id}}(x_i - x_{i+1}, z_{i+1})} \quad (5)$$

Von den Gradienten in der bisher verwendeten Formel für die Tiefenbestimmung, die als Näherung erster Ordnung angesehen werden kann, werden jeweils im Zähler und Nenner die Einflüsse der Nachbarbügel abgezogen (Näherung 2. Ordnung). Dazu werden für die idealisierten Signale der beiden nächsten Nachbarn die Ableitungen von analyti-

schen Signalapproximationen unter Verwendung der in erster Ordnung bestimmten Tiefen $z_{i\pm 1}$ angesetzt.

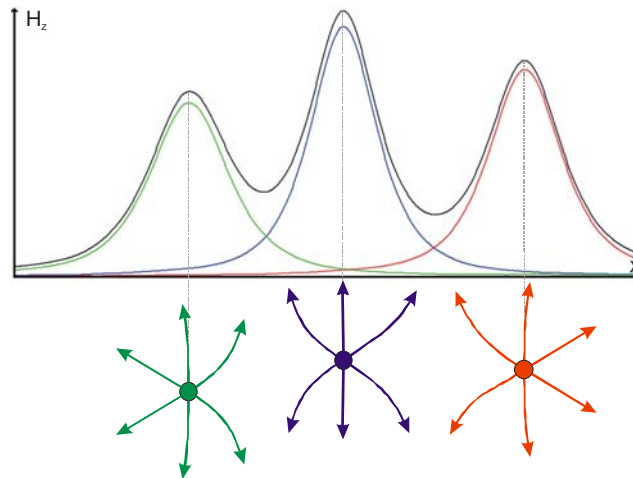


Abb. 8. Die drei farbigen Kurven zeigen die vertikalen Magnetfelder dreier unabhängiger Bewehrungsbügel. Das Gesamtfeld (schwarz) ergibt sich bei Vernachlässigung der magnetischen Wechselwirkung als Summe der Einzelfelder. Für die störungstheoretische Korrektur wird das Feld des betrachteten Einzelbügels (blau) ermittelt, indem die analytisch approximierten Signale der beiden Nachbarbügel (grün und rot) vom gemessenen Gesamtfeld (schwarz) subtrahiert werden.

Weitere Verbesserungen beinhalten die Steigerung der Auflösung der Radarmessungen durch den Einsatz neuer Georadarsysteme und hochfrequenter Antennen von GSSI sowie die Optimierung der Messgeschwindigkeit.

Eine unter Baustellenbedingungen einsetzbare automatische Messdatenanalyse soll vor Ort die Feuchte und den Chloridgehalt des Beton unter der Asphaltdecke kartographisch darstellen, um anschließend durch visuelle Inspektion, Probebohrungen, Bohrmehlentnahme für genaue Laboruntersuchungen und andere Maßnahmen das Ausmaß der Schädigungen punktgenau erfassen zu können. Damit soll ermöglicht werden, feuchte und chloridverseuchte Bereiche mit evtl. bereits korrodierten Bewehrungsseisen effektiv und wirtschaftlich zu lokalisieren. Ort und Eingreifzeitpunkt für Erhaltungsmaßnahmen soll genauer als bisher bestimmt werden. Das neue Verfahren würde somit einen hohen Nutzen bei vergleichsweise geringen Kosten erzielen.

Referenzen

- [1] H.-J. Krause, E. Rath, G. Sawade, F. Dumat, Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B55, Bergisch Gladbach (2007).
- [2] H.-J. Krause, E. Rath, G. Sawade, F. Dumat, Radar-Magnet-Betontest – Eine neue Methode zur Bestimmung der Feuchte und des Chloridgehaltes von Brückenfahrbahnplatten aus Beton Beton- und Stahlbetonbau 102, 825-834 (2007).
- [3] U. Schlemm, Messung von Feuchte- und Salzprofilen mit Mikrowellen – Untersuchung von Störeinflüssen und Verbesserung der Messeigenschaften, Dissertation, TU Hamburg-Harburg (2003).
- [4] Krause, H.-J., Winkler, T., Dang, C., Owsiejewicz, D., Sawade, G. Dumat, F., Rath, E., A novel Radar-magnetic technique for dielectric permittivity mapping of bridge decks in order to determine moisture and salinity of the concrete, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, 25.-29. Sept. 2006, DGZfP Proceedings BB 103-CD, We.1.3.2 (2006).
- [5] 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).