

Die magnetische Tomografie und ihre Anwendung in der ZfP

Prof. Dr. Gerd Lehmann und Prof. Dr. Reinhold Weiß, Dresden

Unter magnetischer Tomografie verstehen wir die zerstörungsfreie Abbildung von magnetischen oder metallischen Körpern bzw. von Defekten in diesen mit Hilfe magnetischer Felder.

Magnetische und elektromagnetische Messungen werden in beträchtlichem Umfang in der zerstörungsfreien Untersuchung eingesetzt. Dabei wird die Reaktion der zu untersuchenden Körper auf äußere statische oder dynamische Magnetfelder untersucht. Den konventionellen Verfahren sind jedoch durch die Reichweite der Felder, durch ihre Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen, ihrer räumlichen Auflösung eng benachbarter Objekte [1] und zum Teil auch in ihrer Produktivität enge Grenzen gesetzt.

Die magnetische Tomografie versucht, diese Grenzen durch eine Reihe innovativer Maßnahmen der Informationsgewinnung und -verarbeitung zu überwinden, über die im folgenden zu berichten ist. Sie ist sowohl in ihrer grundsätzlichen Vorgehensweise als auch in den dabei erzielten Fortschritten gegenüber dem Stand der Technik vergleichbar mit den aus der Medizintechnik bekann-

ten tomografischen Verfahren, die der nichtinvasiven Erzeugung dreidimensionaler Abbilder von Körpern dienen. Diesen Verfahren ist folgende Vorgehensweise gemein:

1. Es wird eine wohldefinierte Einwirkung von außen erzeugt (Strahlung bzw. Felder, die von Quellen an definierten Orten bzw. mit definierten Richtungen erzeugt werden).
2. Die Reaktion des zu untersuchenden Körpers auf die äußere Anregung wird gemessen, die jedoch keinen eindeutigen Rückschluss ermöglicht, da das Signal die Reaktion vieler Raumpunkte in integraler Weise zusammenfasst. Es stellt somit eine Projektion des dreidimensionalen Raumes auf einen zwei- oder eindimensionalen Unterraum dar. Die Messung wird daher viele Male unter geänderten äußeren Bedingungen wiederholt, um eine möglichst vollständige Information zu erhalten.
3. Aus den anfallenden jeweils zwei- oder eindimensionalen 'Einzelbildern' wird auf das dreidimensionale Bild zurückgeschlossen, diese 'Dekonvolution' erfordert leistungsfähige Rechner und schnelle Algorithmen.

4. Dieses Bild lässt sich dann u. a. durch verschiedene (virtuelle) zweidimensionale Schnitte durch den untersuchten Körper visualisieren.

5. Bei einem tiefen Verständnis der Mechanismen, die für die Signalentstehung im untersuchten Körper entscheidend sind, sowie mit Hilfe vorhandener Informationen über die grundsätzliche Struktur des untersuchten Körpers kann das dadurch vorliegende Zusatzwissen dafür genutzt werden, die Qualität der Abbildung zu erhöhen und den erforderlichen technischen und zeitlichen Aufwand für die Aufnahme und damit die Kosten zu reduzieren.

Die einzelnen tomografischen Verfahren (Röntgentomografie, NMR-Tomografie, Positronen-Vernichtungstomografie, Ultraschalltomografie, magnetische Tomografie) unterscheiden sich dabei nur durch die physikalische Art der äußeren Anregung, der Kontrastentstehung, der daraus resultierenden integralen Reaktion und der Art der geänderten Parameter der Quellen bei den Wiederholungsmessungen. Diese Spezifika der einzelnen tomografischen Verfahren sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Verfahren	Einwirkung von außen	Kontrasterzeugung durch	integrales Signal mittels über	wiederholte Messung	Zusatzwissen
Röntgen-Tomografie	Röntgenquelle	Absorptionskoeffizient	Strahlverlauf (Linie)	verschiedene Strahlrichtungen	Kenntnisse über Kontrastverlauf
NMR-Tomografie	HF-Resonanzfeld	Protonendichte	Fläche gleicher Stärke des Magnetfeldes	Orientierung des Magnetfeldes	Mechanismen Signalentstehung
Positronenannihilation	e ⁺ - e ⁻ - Zerstrahlung	Elektronendichte	Orientierung der Sensoren für die γ - Quanten	Fläche normal zu korrelierten γ - Quanten	- homogene Teilgebiete - Sensorfusion
Ultraschall-Tomografie	US-Sender	Unterschiede Massendichte	Position des US-Sensorarrays	Laufzeiten	Trennflächen
Magnetische Tomografie	äußeres Magnetfeld	Permeabilität $\mu(r)$ Leitfähigkeit $\sigma(r)$	Volumen	variable Sensororte	Signalentstehung Trennflächen

Tabelle 1: Tomografie - Prinziplösungen

Anzeige Nosbüsch

Tomografie - Prinziplösungen

Gemeinsam ist allen Verfahren das Prinzip der Rekonstruktion einer dreidimensionalen Information aus einer Vielzahl ein- oder zweidimensionaler Projektionen für unterschiedliche Einsatzbedingungen. Wesentlich ist dabei, möglichst umfangreiche Primärinformationen zu erhalten und diese auch vollständig in den Rechneralgorithmen auszuwerten.

Bei technischen Anwendungen ist es weiterhin ganz entscheidend, die zur Verfügung stehende physikalische Zusatzinformation in die Lösung vollständig einzubeziehen. Derartiges Zusatzwissen kann die physikalischen Mechanismen der Signalentstehung, Informationen über die Homogenität der Targets oder auch die Existenz und Beschaffenheit von Grenzflächen betreffen.

In der Röntgentomografie tragen alle N Voxel (d. h. die elementaren Raumpunkte; N ist je nach Auflösung eine Zahl zwischen 100 und 1000), die ein Röntgenstrahl durchläuft, zu dessen Schwächung bei und erzeugen auf dem Bildschirm die Schwärzung eines Pixels. Will man die Information über ein einzelnes Voxel haben, so sind mindestens N unabhängige Röntgenaufnahmen mit unterschiedlichen Strahlrichtungen erforderlich. Die Dekonvolution der Information dieser N zweidimensionalen Bilder in Informationen über die N von jedem Strahl berührten Voxel, erfordert einen leistungs-fähigen Rechner.

Die Einbeziehung von physikalischem Zusatzwissen über das Pro-

blem kann den experimentellen und numerischen Aufwand beträchtlich reduzieren.

Während im menschlichen Körper sich die Absorptionseigenschaften der Weichteile nur schwach und kontinuierlich ändern und außerdem nur geringe Unterschiede der Absorption von gesundem und kanzerogenem Gewebe nachgewiesen werden müssen, ändern sich bei vielen technischen Problemen die Materialeigenschaften abrupt. Sollen die genauen Orte von Fehlern oder Bohrungen nachgewiesen werden, braucht man nur die plötzliche Änderung des Absorptionsfaktors von Null auf seinen Maximalwert zu berücksichtigen. Weiterhin verlaufen technische Trennflächen zwischen diesen Gebieten relativ glatt. Vengrinovich u. a. [2] haben praktisch nachgewiesen, dass bei Berücksichtigung dieser Bedingungen drei bis fünf Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen tomografische Bilder derselben Qualität und Auflösung liefern wie das konventionelle tomografische Verfahren mit N derartigen Aufnahmen.

Die magnetische Tomografie liefert bei magnetostatischen Messungen Informationen über die Verteilung der remanenten Magnetisierung $M_0(r)$ bzw. der magnetischen Permeabilität $\mu(r)$, bei dynamischen Messungen (z. B. Wirbelstromverfahren) über die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit $\sigma(r)$. Diese für die Signalentstehung entscheidenden Werkstoffeigenschaften treten als Parameter in den Quellen der Maxwellschen Feldgleichungen auf.

Bei der direkten Lösung der Maxwellschen Gleichungen sind bei bekannten Quellen $Q(r)$ die erzeugten Felder $F(r)$ zu berechnen („direktes Problem“)

$$Q(r) \rightarrow F(r)$$

Diese Aufgabe ist bei Vorgabe der physikalischen Randbedingungen eindeutig lösbar.

Bei der magnetischen Tomografie interessieren wir uns für die sogenannte „Inverse Aufgabe“, die Bestimmung der Quellen der Felder aus Messung in Gebieten außerhalb derselben

$$F(r) \rightarrow Q(r)$$

Aus der Elektrostatik, die ebenfalls wie die Magnetostatik durch die Poissongleichung beschrieben wird, ist bekannt, dass diese Umkehrung nicht möglich ist: Zum Beispiel erzeugen alle kugelsymmetrischen Ladungsverteilungen mit derselben Gesamtladung im Außenraum dasselbe Feld.

Die Lösung der Poissongleichung stellt für diesen Fall eine Projektion des N -dimensionalen Funktionsraumes (mit $N \rightarrow \bullet$, dieser Raum wird Hilbertraum genannt, wenn als Maß für den Abstand zweier Punkte die mittlere quadratische Abweichung eingeführt wird) auf einen eindimensionalen Raum (nämlich die Gesamtladung) dar. Diese Projektionseigenschaft verbietet die Lösung des inversen Problems im strengen Sinne. Diese Tatsache wird in der Literatur manchmal übersehen. Zum Beispiel wird in der Patentanmeldung [3] eine Lösung des statischen inversen Problems für eine ebene Ladungsverteilung durch

Fouriertransformation geschützt. Ohne zusätzliche Annahmen ist das aber nur möglich für sehr dünne Schichten, in denen sich die Ladungsdichte in der vertikalen Richtung nicht ändert. Ein Ausweg aus dieser Situation eröffnet sich nur dann, wenn die Dimension des Hilbertraumes durch zusätzliches physikalisches Wissen zum Problem stark vermindert wird. Das ist beispielsweise möglich, falls es sich nur um linienhafte Materieverteilungen mit unbekanntem Orientierungen handelt. Die Dimension des Hilbertraumes kann dann als Anzahl der unabhängigen Lösungen der Feldgleichungen verstanden werden, die für die Beschreibung der entscheidenden Phänomene ausreicht.

Diese grundsätzliche Situation ändert sich für zeitabhängige Anregungsfelder. Durch sie werden in metallischen Objekten Wirbelströme induziert, die Aussagen über den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit ermöglichen. Das räumliche Verhalten wird durch die Lösungen eines stationären Eigenwertproblems beschrieben, das durch ein vollständiges, orthonormales Eigenwertspektrum beschrieben wird. Deshalb existiert in diesem Fall eine strenge Lösung des inversen Problems. Anschaulich lässt sich dieser Sachverhalt dadurch verstehen, dass periodische magnetische Felder je nach ihrer Frequenz eine unterschiedliche Eindringtiefe aufweisen und damit die Leitfähigkeit in unterschiedlichen Tiefenbereichen austesten.

In praktischen Fällen muss immer ein Kompromiss zwischen der erwünschten räumlichen Auflösung und der durch die Messgenauigkeit begrenzten verfügbaren Information gefunden werden. Die Fusion von statischen und dynamischen Messungen in einer Messapparatur verbessert immer die korrekte Interpretation der Messergebnisse.

Schließlich dürfen die begrenzenden Faktoren der magnetischen Tomografie nicht unerwähnt bleiben: Das betrifft die durch ein Potenzgesetz (r^{-3}) mit dem Abstand r stark abfallenden Felder, die mitunter sehr eingeschränkte Zugänglichkeit für die Felderzeugung und die Sensoren um das Untersuchungsob-

jekt und insbesondere interne und externe Störungen des Messprozesses. Durch Nutzung der Redundanz der Messung lässt sich der Einfluß des internen und Umgebungsrauschens durch die magnetische Tomografie reduzieren. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Anwendung von Sensorfeldern, der bereits erwähnten Sensorfusion sowie in selbstadaptiven nicht-linearen Filtertechniken, in die das erwähnte physikalische Zusatzwissen einfließt. Die Messsysteme werden durch eine grafische Präsentation der Ergebnisse vervollständigt.

Bei der Anwendung der magnetischen Tomografie in Geräten spielt eine entscheidende Rolle, welche Eigenschaft für den Kunden besondere Bedeutung besitzt. Diese figure of merit kann sein:

- die Nachweisgrenze einer Meßgröße (z. B. minimale Objektgröße, Objektiefe und dergl.)
- die Präzision des Ergebnisses (z. B. hinsichtlich der Position und Lagereparameter)
- die Reduktion von Störeinflüssen bei komplizierten Umgebungsbedingungen
- die maximale Anzahl der Objektparameter wie Ort, Lage, weitere Charakteristika, mit denen ein unbekanntes Objekt bzw. ein Defekt zu beschreiben ist

Im folgenden werden einige Produkte vorgestellt, die durch unterschiedliche Anwendungsbedingungen ausgezeichnet sind.

Vermessung der Lagen von Dübeln und Anker in Betonfahrbahnen

In stark belasteten und langlebigen Betonfahrbahnen sind gemäß ZTV Beton-StB 01 (erste Ausgabe 1993) zur Lastübertragung und Sicherung gleicher Höhenlage der Platten in den Quertiefen Dübel und in den Längstiefen Anker einzusetzen. Die Art, die Anzahl der Dübel und Anker sowie ihre genaue Einbaulage sind detailliert vorgeschrieben, damit keine Schädigungen der Dehnungsfugen auftreten. Für die Lage und Orientierung der Dübel sind aufgrund ihrer besonderen Funktion sehr enge Toleranzen (im mm-B-



Bild 1: Messung der Dübellagen im Frischbeton mit dem MIT-SCAN 2F unmittelbar hinter dem Fertiger

reich) festgelegt. Durch den Fertigungsprozeß der Betondecken bedingt und in Abhängigkeit von der eingesetzten Technik treten eine Reihe von Fehllagen der Dübel und Anker auf. Analoges gilt auch für Verkehrsflächen auf Flughäfen, obwohl dort der Einbau der Dübel auf ‚Körben‘ erfolgt.

Bis vor kurzem war es nicht möglich, die von der ZTV Beton-StB vorgeschriebenen Lagen von Dübeln und Ankern mit einem wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu überprüfen. Für eine zerstörungsfreie Kontrolle des Fertigungsprozesses bestanden bisher überhaupt keine Ansätze zur Messung im Frischbeton.

Die auf des Basis der magnetischen Tomografie entwickelte Gerätesysteme MIT-SCAN 2 und MIT-SCAN F (Abb. 1) lösen die Prüfaufgabe durch Messung der Antwortsignale auf gepulste dynamische Anregungen mit einer Multisensor-Anordnung. Diese Signale werden in ihrem zeitlichen und räumlichen Verlauf analysiert. Da der Typ und die Größe der Armierungsstähle bekannt sind, kann dieses umfangreiche Zusatzwissen in die intelligente Signalverarbeitung einbezogen werden. Äußere Störungen, die etwa von magnetischen Zuschlagstoffen oder störenden Metallteilen im Beton oder anderen externen Quellen stammen, können auf diese Weise klar von den Nutzsignalen unterschieden werden. Die Lageabweichungen der einzelnen Dübel können schnell, kosteneffektiv und genau auf der Baustelle bestimmt und über einen kleinen Drucker ausgegeben werden. Im Vergleich zum Bodenradar benötigen die Messun-

gen mit dem MIT-SCAN keinerlei zerstörende Kalibrierungsmessungen. Sie sind mindestens um einen Faktor 40 schneller und einen Faktor drei genauer als Bodenradar. In umfangreichen Untersuchungen und zahlreichen Messeinsätzen konnte das System seine hohe Messgenauigkeit und seine überragende Produktivität überzeugend demonstrieren [4]. Bei mehreren Einsätzen auf Autobahnbaustellen konnte der Nachweis erbracht werden, dass eine optimale Einstellung des Fertigungsprozesses möglich ist. Die spezielle Software MAGNOPROOF gestattet auch die Auswertung komplizierter Situationen mit starken Abweichungen von den Normlagen und die Visualisierung der Ergebnisse.

Bemerkenswert ist weiterhin die erreichte hohe räumliche Selektivität: Benachbarte Armierungsstäbe können noch bei einem Tiefen-Abstands-Verhältnis R von 1,65 unterschieden werden [5]. Wegen der Überlappung der Signale benachbarter Stäbe wird in konventionellen Geräten nur ein Verhältnis von 0,7 erreicht [1].

Messung von Schichtdicken

Dasselbe Messprinzip wird in dem Gerät MIT-SCAN-T zur Bestimmung der Dicken nicht-magnetischer und nicht-metallischer Schichten (z. B. aus Beton, Mauerwerk oder Asphalt) angewandt. Dazu wird ein definiertes metallisches Objekt (Reflektor) auf der entgegengesetzten Seite der Schicht angebracht, dessen Antwortsignale als Funktion der lateralen Koordinaten vermessen und verarbeitet werden. Der Vorteil gegenüber anderen Lösungen zur Dickenmessung besteht darin, dass die Lage des Reflektors bei der Über-



Bild 2: Multisensorsystem MIT-EXPLORER

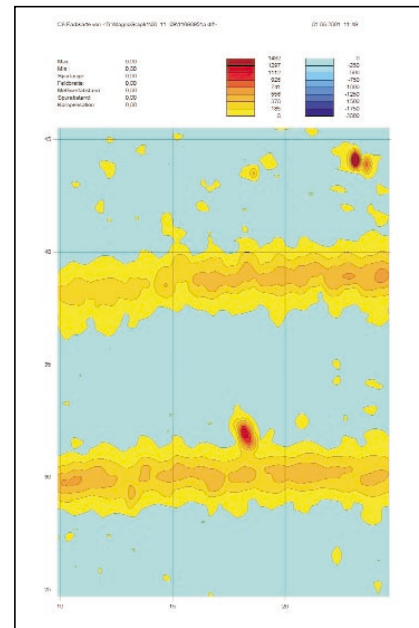
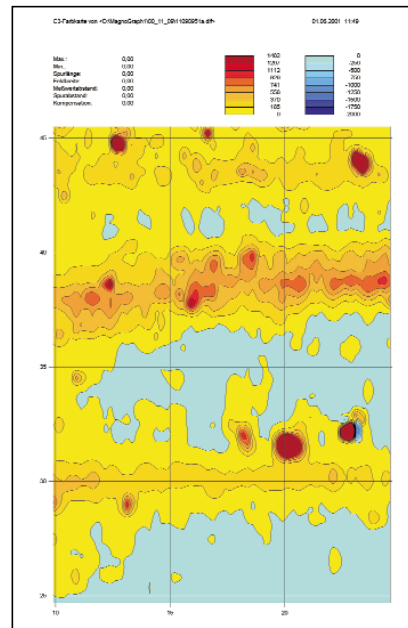


Bild 3: Laterale Signalverteilung in verschiedenen Zeitkanälen, links: Registrierung aller metallischen/magnetischen Teile, rechts: Ausblendung der Signale kleinerer Metallteile und von Hochofenschlacke

fahrung nur ungefähr bekannt sein muss, sowie in der Toleranz des Verfahrens gegenüber Störungen. So erkennt das Gerät automatisch Abweichungen von der Größe des Reflektors, die bei anderen Geräten zu Fehlern in der Dickenmessung führen.

Erkundung und Charakterisierung vergrabener Objekte

Weitere Anwendungen betreffen zerstörungsfreie Prüfung in einem sehr speziellen Sinn – die Gewinnung von detaillierten Informationen über in der Erde verborgene metallische/magnetische Objekte ohne Grabungen. Diese Aufgabe kann auf verschiedenen Qualitätsstufen erfüllt werden: Nachweis der Anwesenheit solcher Körper – laterale Lokalisierung – Bestimmung der Größe – Bestimmung der Tiefe – Charakterisierung (Form, Orientierung, Art). Ernste Probleme bei der Realisierung dieses Programms mit wachsender Schwierigkeit entstehen durch die Anwesenheit starker Umgebungstörungen. Sie können überwunden werden durch die erwähnte Kombination von statischen und dynamischen Sensoren. Das Gerät MIT-EXPLORER (Abb. 2) fusioniert diese beiden Sensorprinzipien und enthält außerdem mehrere Sen-

soren jeden Typs. Abb. 3 demonstriert die Möglichkeiten zur Unterscheidung und Lokalisierung metallischer Objekte in der Nähe von metallischen Kabeln und Versorgungsleitungen. Weiterhin können durch die zeitliche Analyse der Antwortsignale Gebiete mit einem hohen Anteil von kleinteiligem Schrott oder mit Hochofenschlacke geschottete Wege deutlich unterschieden werden (siehe Abb. 3: a) zeigt die Signale eines Sensorkanals, der auf alle magnetischen/metallischen Teile reagiert, b) unterdrückt die Kleinteile und Schlacke). Mit den konventionellen magnetostatischen Untersuchungen sind derartige Aussagen völlig unmöglich.

Schlussbemerkung

Ähnlich wie die bekannten tomografischen Verfahren vereinigt die magnetische Tomografie eine Anzahl innovativer Lösungen, die ihre Leistungsfähigkeit gegenüber der konventionellen magnetischen ZfP und Methoden zur Metaldetektion entscheidend verbessern. Sie sind u. a. gekennzeichnet durch den Einsatz von Sensorfeldern, Sensorfusion, rechnergestützte Datenerfassung und -speicherung. Ein wichtiger Aspekt ist die Datenverarbeitung auf der Basis von Modellen, die das ver-

fügbare physikalische Wissen einbeziehen und die gesamte gewonnene Information (und nicht nur Teilinformationen) berücksichtigen. Sie bietet die Möglichkeit für neuartige Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung und Prozeßkontrolle, die sich durch verbesserte Genauigkeit und Nachweisgrenzen, verminderte Störempfindlichkeit, erhöhte Produktivität und die Vermeidung aufwändiger Kalibriermessungen auszeichnen. Dabei sind auch nicht-invasive Untersuchungsmethoden in der Medizin einzubeziehen.

Zitierte Literatur

[1] Alldred, J. C.: Quantifying the losses in cover-meter accuracy due to congestion of reinforcement, Edinburgh, 1993
 [2] Vengrinovich, V., V.; Denkevich, Yu., B.; Tillack, G.-R.; Nockemann, Ch: Multi Step 3D X-Ray Tomography for a Limited Number of Projections and Views, Rev. Progr. QNDE, Vol.

16, 1997, pp. 317 – 323, Plenum Press, New York, eds.: D. O Thompson, D. E. Chimenti
 [3] DE 43 42 100 A1, Forschungszentrum Jülich, 10. 12. 1993
 [4] Lehmann, G.; Grieger, Ch.; Gebauer, R.: Erste Erfahrungen bei der zerstörungsfreien Prüfung der Lage von Dübeln und Ankern in Betonfahrbahnen mit dem MIT-SCAN, Straße und Autobahn, erscheint 10/2001
 [5] Hentschel, L.: Untersuchung eines neuen Messgerätes für die zerstörungsfreie Ortung der Dübel und Anker in Betonfahrbahnen, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), 2000

Die Autoren:

Beide Autoren sind Gründer und Geschäftsführer der MIT GmbH Magnetic Imaging Tools. Die Firma sieht es als eine ihrer Aufgaben an, mit entsprechenden kompetenten

Partnern neue Anwendungsgebiete und Problemstellungen zu definieren und zu erschließen, die konventionellen Verfahren nicht zugänglich sind.

Die MIT GmbH war Gastgeber der Sitzung des DGZfP-Arbeitskreises Dresden im Mai 2001. Sie besteht seit 5 Jahren. 1997 startete sie mit den beiden Gründern und beschäftigt nunmehr 11 Mitarbeiter. In dieser Zeit wurden die Verfahren der magnetischen Tomografie entwickelt und in ersten Produkten verwirklicht.

Weitere Informationen:

Prof. Dr. rer. nat. habil. G. Lehmann
 Prof. Dr. sc. nat. Reinhold Weiß
 MIT GmbH Magnetic Imaging Tools
 Gostritzer Straß 61 – 63
 01217 Dresden
 Tel.: 0351-871 8125
 Fax: 0351-871 8127
 e-mail mit@mit.tz-dd.de
 Internet www.mit-dresden.de