

## **Entwicklung eines Radarantennenarrays zur Untersuchung des Untergrundes im Schottergleisbett**

Th. Kind, Ch. Maierhofer  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Die Erarbeitung der Grundlagen für effiziente und bedarfsgerechte Instandsetzungsmaßnahmen an Schottergleisbetten ist das Ziel des Projektes „SafeRail“. Das Impulsradarverfahren wird als zerstörungsfreie Methode für die Zustandsbestimmung des Schotters verwendet, um entsprechend den hohen Anforderungen der Netzbetreiber Unterbrechungen des Schienenverkehrs weitgehend zu vermeiden. Für eine automatisierte Bewertung der Vermischung des Schotters mit dem Untergrund sowie des Abnutzungszustandes des Schotters wird ein Antennenarray entwickelt, das bezüglich seiner Messgeometrie optimiert wird.

Schotter aus dem Schottergleisbett wird zurzeit in regelmäßigen Zeitabständen gereinigt und neu verdichtet, um die Elastizität und Drainageeigenschaft des Schotters zu erhalten bzw. wieder herzustellen und um damit eine gute Lastverteilung in den Untergrund zu gewährleisten. Ursache für die Verschmutzung des Schotters sind das Eindringen von Fremdstoffen von der Oberfläche, Bruch des Schotters unter Last und bei der Verdichtung und die Vermischung des Schotters mit dem Untergrund [1]. Durch das wiederholte Verdichten bei der Reinigung des Schotters im Rahmen regelmäßiger Instandsetzungsmaßnahmen des Gleisbetts reduziert sich die Korngröße und die Scharfkantigkeit der Schottersteine, so dass der Schotter nach einer bestimmten Anzahl von Reinigungsschritten komplett ausgetauscht werden muss. Eine bedarfsgerechte Ermittlung des Zeitpunktes der tatsächlichen Verschmutzung des Schotters kann eine Verlängerung der Reinigungszyklen und damit der Lebensdauer des Schotters bewirken und somit erheblich Kosten einsparen.

Mit herkömmlichen Impulsradarsystemen wurde gezeigt, dass das Impulsradarverfahren geeignet ist, um Grenzflächen im Aufbau des Schottergleisbetts zu detektieren [2, 3, 4]. Durch den Unterschied in den dielektrischen Eigenschaften von Schotter und Untergrund entstehen Reflexionen an dem Übergang, die mit einem Empfänger als Nachweis des Überganges gemessen werden. Zusätzlich lässt sich die Lage der Schwellen anhand der unterschiedlichen oberflächennahen Reflexionen oberhalb und zwischen den Schwellen bestimmen. Bei bekannter und konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der elektromagnetischen Impulswelle berechnet sich aus der gemessenen Laufzeit  $t$  der Reflexion die Dicke  $d$  des Schotters nach  $d=v*t/2$ . Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Impulswelle im Schotter setzt sich aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft und der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Schotterstein zusammen, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft in etwa der maximal möglichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Vakuum entspricht (ca. 30cm pro ns). Mit zunehmendem Grad der Verschmutzung des Schotters sinkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit, da der Anteil der mit Luft gefüllten Zwischenräume abnimmt. Da die Verschmutzung des Schotters sich örtlich ändern kann, ist aus einer Änderung der Laufzeit der Reflexion am Schotter/Untergrund Übergang entlang des Fahrweges keine eindeutige Aussage darüber möglich, ob diese durch

eine Änderung der Schotterdicke oder durch die Änderung der Verschmutzung verursacht wird.

In dem „SafeRail“ Projekt wird ein für die Schotteruntersuchung neuartiges Antennenarray aufgebaut, mit dem Messungen zur Unterscheidung einer Verschmutzung des Schotters von einer Dickenänderung möglich sind. Durch die Verwendung mehrerer Antennen im Antennenarray kann lokal an einem Ort mit unterschiedlichen Abständen zwischen Sender- und Empfängerantenne gearbeitet werden. Bei konstanter Tiefenlage des Schotter/Untergrund Überganges ändert sich der Laufweg der elektromagnetischen Impulswelle durch die unterschiedlichen Abstände  $s$  der Sender und Empfänger (Abbildung 1). Durch eine Messung verschiedenen Laufzeiten  $t_n$  und  $t_m$  lässt sich lokal eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  bestimmen:

$$v = \sqrt{\frac{s_n^2 - s_m^2}{t_n^2 - t_m^2}}$$

Diese Formel entspricht auch der bei der Common Midpoint Anordnung (CMP) verwendeter Formel, um Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Böden zu bestimmen [5, 6].

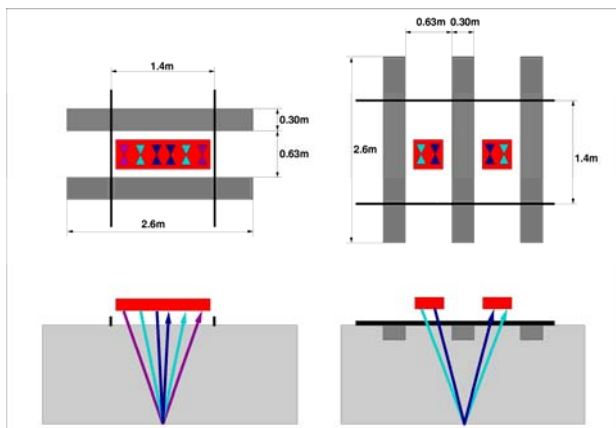


Abbildung 1: Lineare Anordnung von Antennen entlang einer Schwelle oder senkrecht zur Schwelle

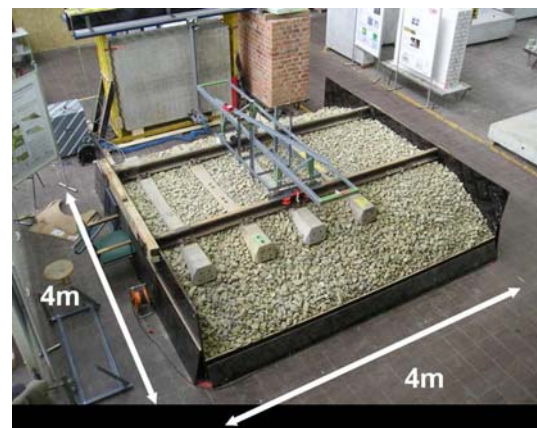


Abbildung 2: Schotterprobekörper, aufgebaut in einer Versuchshalle

Ein Schotterprobekörper mit den Abmessungen 4m x 4m wurde aufgebaut (Abbildung 2), um unterschiedliche Konfigurationen von Sende- und Empfangsantennen zu testen. Der Probekörper wurde mit vier Beton-Schwellen und zwei Schienen aufgebaut, um möglichst praxisnahe Test durchführen zu können und den Einfluss der Schwellen und Schienen auf die Radarmessung zu untersuchen. Die Höhe des Schotterbetts beträgt ca. 80cm. Der gesamte Aufbau des Probekörpers wurde in einer Halle durchgeführt, um später reproduzierbare Messungen durchführen zu können.

In der ersten Phase des Projektes werden unterschiedliche Antennen-Anordnungen in einem Array mit kommerziellen Antennen simuliert, indem nacheinander die Sende- und Empfangantennen für die Messungen an die entsprechenden

Arraypositionen platziert wurden. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen die Messungen für ein lineares Array bestehend aus drei Sendern T1-T3, drei Empfängern R1-R3 mit paralleler Orientierung zur Schwelle. Diese Anordnung wurde gewählt, damit der Einfluss der Schwellen auf den Laufweg der Impulswelle für alle Kombinationen aus Sender- und Empfänger gleich groß ist. Abbildung 3 zeigt schematisch die nacheinander verwendeten Anordnungen der Antennenpaare und die dazu gehörigen Laufwege der Impulswellen im Querschnitt. Die Farben der umrandeten Fotos der Antennenanordnung entsprechen den Farben des jeweiligen eingezeichneten Laufweges. Die gewählte Antennenpolarisation (Ausrichtung des elektrischen Feldes) war senkrecht zu den Schwellen und parallel zu den Schienen. Die Antennenmittenfrequenz betrug 500MHz, die eine gute Eindringtiefe gewährleistet.

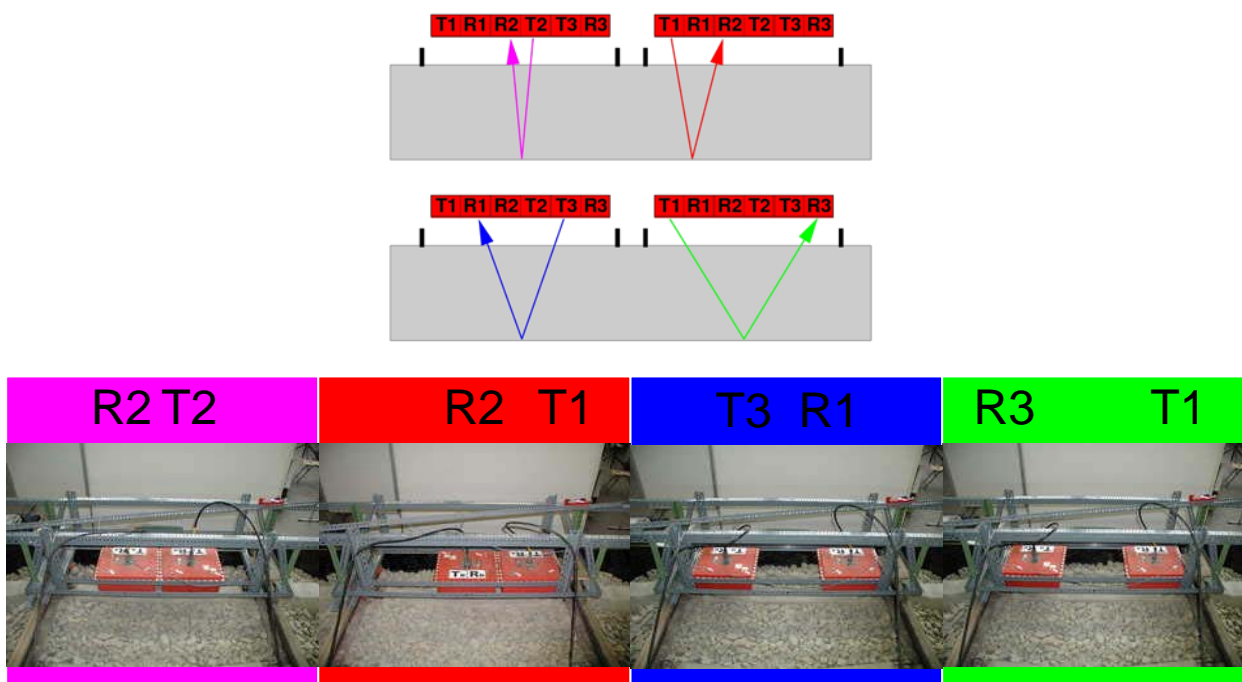


Abbildung 3: Die Bilder in der unteren Reihe zeigen jeweils die Anordnung zweier 500MHz Antennen um die jeweiligen farblich gekennzeichneten Laufwege des in der oberen Reihe dargestellten linearen Antennenarrays zu simulieren

Die mit einer kommerziellen 500MHz Antenne aufgenommenen Radargramme sind in Abbildung 4 dargestellt. In allen vier Radargrammen ist die Reflexion des Schotter/Untergrund Überganges in den Bereich zwischen 12 und 16ns sichtbar. Erwartungsgemäß ist das direkte Übersprechen in Luft zwischen den Antennen mit geringerem Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne stärker ausgeprägt als bei größerem Abstand. Die Reflexionen des Schotter/Untergrund Überganges sind von allen vier Antennenordnungen als A-Scan in Abbildung 5 gemeinsam dargestellt. Die Zunahme der Laufzeit mit größerem Laufweg ist klar zu erkennen. Die Amplituden der Reflexionen nehmen mit größerem Laufweg wie erwartet ab, bis auf die Ausnahme des Laufweges der Sende-/Empfangsantenne T1/R2. Die erhöhte Dämpfung dieses Laufweges ist wahrscheinlich durch die sehr nahe Position des Senders an der Schiene begründet.

Eine qualitative Auswertung der Laufzeitzunahme durch den erhöhten Laufweg für unterschiedliche Antennenseparationen ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierzu wurden die Maxima der Reflexionen des Schotter/Untergrund Überganges im Zeitbereich zwischen 12 und 16ns für jeden Messpunkt entlang der Messspur bestimmt und in einem Diagramm in Abbildung 5 dargestellt. Die Linien der drei Laufzeiten verlaufen annähernd parallel, wie bei einem homogenen Schotter zu erwarten ist. In den Bereichen der Schwellen werden die Laufzeiten für alle drei Anordnungen gleichmäßig verzögert. Dieses Ergebnis zeigt, dass grundsätzlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Impulswellen im Schotter mit einem linearen Array gemessen werden kann. Die quantitative Auswertung der Laufzeiten für unterschiedliche Antennenseparationen soll im laufenden Projekt untersucht werden. Das Messen mit nacheinander aufgebauten Sender/Empfängerkombinationen ist zeitaufwendig und eignet sich deshalb nur für Messungen im Labor oder an einem Schotterprobekörper mit den hier gezeigten Ausmaßen von 4m x 4m. Ein Prototyp mit einem Sender und drei Empfängern wird z. Zt. aufgebaut, um auch an bekannten Schottergleisbetten über eine längere Strecke als 4m zu messen.

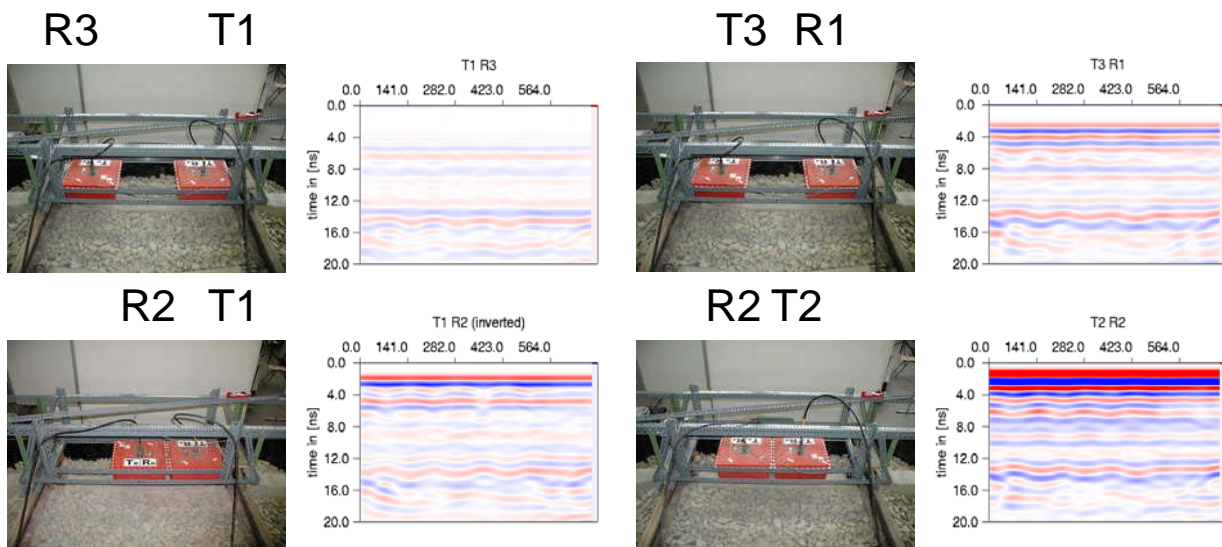


Abbildung 4: Radargramme der jeweiligen Sende-/Empfängerpositionen

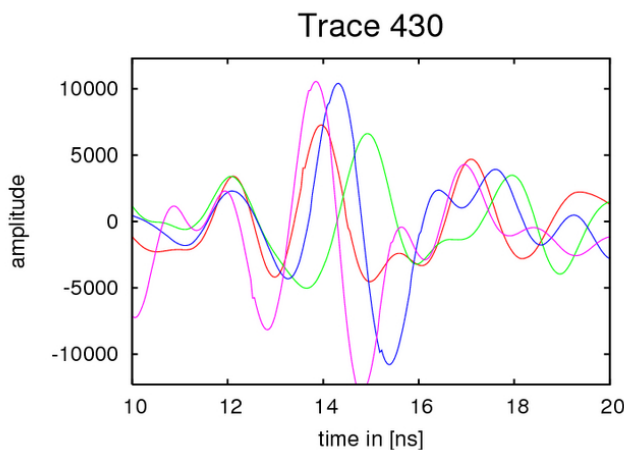


Abbildung 5: Ausschnitt aus den A-Scan aller Sende-/Empfängerpositionen aus Abbildung 3 und 4 in dem Bereich mit der Reflexion des Schotter/Untergrund Überganges (ca. 13,75ns bis 15ns)

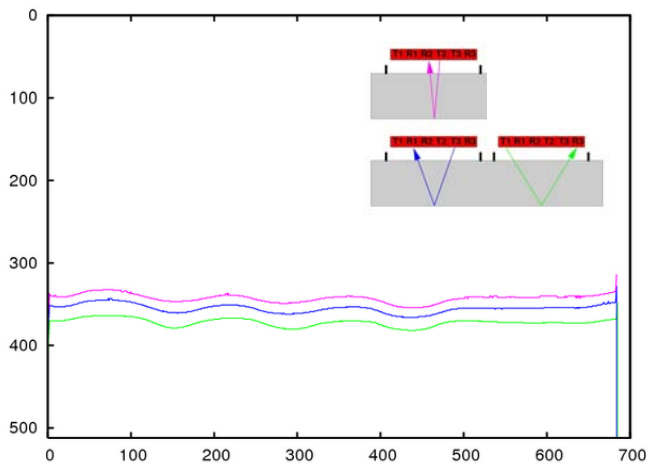


Abbildung 6: Qualitative Darstellung der Maxima der Schotter/Untergrund Reflexionen aus Abbildung 4 für die Sender-/Empfängerkombinationen R3/T1, T3/R1 und R2/T2



Abbildung 7: Prototyp des linearen Antennenarrays mit einem Sender und drei Empfängern

Das „SafeRail“ Projekt wird von der EU seit Februar 2004 für vier Jahr im 6. Rahmenprogramm gefördert. Bearbeitet wird das Projekt von einem Konsortium bestehend aus acht Partnern, die wissenschaftlichen Einrichtungen, der Industrie und Dienstleistungsunternehmen angehören. Die Partner kommen aus Deutschland, England, Italien, Schweden und der Tschechischen Republik. Die Aufgaben zwischen den Partnern ist in neun Arbeitspakete (Work Packages, WP) aufgeteilt und hat folgende Gliederung:

- WP 1 und 2: Erarbeitung der Systemanforderung und des daraus resultierenden Systems Design
- WP 3: Entwicklung eines schnellen Impulsradarsystems mit einem Antennenarray
- WP 4: Entwicklung eines Positionserfassungssystems
- WP 5: Entwicklung eines on-bord Frühwarnsystems
- WP 6: Entwicklung einer Datenverarbeitungs- und Interpretationssoftware
- WP 7: Systemintegration in einen Inspektionszug
- WP 8: Erprobung
- WP 9: Management

Von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wird das Antennenarray aus Work Package 3 entwickelt. Die hier vorgestellten Untersuchungen und der Aufbau des ersten Prototyps wurden im ersten Teil des SafeRail Projektes durchgeführt. Im weiteren Verlauf soll das Antennenarray erweitert werden und an bekannten Schottergleisbetten erprobt werden.

- [1] E. T. Selig, J.M. Waters, Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford Publications, London, 1984
- [2] G. R. Olhoeft, E. T. Selig, Ground Penetrating Radar Evaluation of Railway Track Substructure Conditions, Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002), Santa Barbara, April 29 – May 2 2002, SPIE Volume 4758, S. 48-53
- [3] W. Al-Nuaimy, A. Eriksen, J. Gasgoyne, Train-Mounted GPR for High-Speed Rail Trackbed Inspection, Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2004), 21-24 June 2004, Delf, S. 631-634
- [4] J. Hugenschmidt, Railway track inspection using GPR, Journal of Applied Geophysics 43, 2000, pp 147-155
- [5] David J. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2<sup>nd</sup> ed., IEE, London, 2004
- [6] Merkblatt B10, Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, DGZFP, 2001