

Kombination von zFP- und Robotersystemen – Ein Konzept für Autonome Systeme zur Fahrbahnprüfung

W. Gebhardt, H. Rieder, M. Spies
Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

K. Berns, C. Hillenbrand
AG Robotersysteme, Technische Universität Kaiserslautern

Einleitung

Das steigende Alter der Infrastruktur unserer Verkehrswege erfordert zunehmend den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren zur verlässlichen Diagnose. Neben den physikalischen Gegebenheiten, die bei der Prüfung von Baustoffen jeglicher Art zu berücksichtigen sind, stellen die Größe der zu prüfenden Flächen sowie die anfallenden Datenmengen zusätzliche, besondere Herausforderungen dar. Die Grundidee für das in diesem Posterbeitrag vorzustellende Prüfkonzept basiert auf der Verbindung einer effektiven Sensorik und Prüfelektronik mit einem autonomen Roboterfahrzeug, wie es bei der AG Robotersysteme mit dem ‚Ravon‘ (Robust autonomous vehicle for offroad navigation) entwickelt wurde. Die Anwendungsbereiche betreffen im Wesentlichen die Fahrbahnprüfung, wobei das Auffinden von Hohlräumen, großflächigen Trennungen, sowie Einschlüssen Hauptzielsetzung ist. Eingesetzt werden sollen dabei niederfrequente Ultraschallprüfköpfe in Arrayform, die mittels Prüfrad-Technologie angekoppelt und verfahren werden. Die weiterzuentwickelnde, robuste Robotertechnologie der AG Robotersysteme in Kombination mit dem schnellen elektronischen Scannen orthogonal zur Bewegungsrichtung mit getrenntem Sende- und Empfangsarray ermöglicht die schnelle autonome Prüfung großflächiger Inspektionsbereiche. Konzepte zum effektiven Datentransport und zur Datenaufbereitung werden ebenfalls diskutiert.

I Ultraschallprüfung von Baustoffen - Hintergrund

Die Diagnose, die Überwachung und die Prüfung von Bauwerken nehmen eine immer größer werdende Bedeutung im Bauwesen ein, nicht zuletzt aufgrund des steigenden Alters unserer Infrastruktur. Im Bereich der Fahrbahnprüfung spielen neben der Beurteilung des Zustandes auch die Beurteilung der Wirksamkeit von Instandsetzungsmaßnahmen und die Früherkennung von Schäden eine wichtige Rolle.

Diese Aufgaben erfordern leistungsfähige Prüfverfahren, die – auch in Kombination – bereits für spezielle Prüfaufgaben gezielt eingesetzt werden (z.B. [1,2]). Die im Bauwesen angewendeten Ultraschallverfahren arbeiten in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 200 kHz. Die in das zu untersuchende Bauteil eingekoppelten Ultraschallwellen werden an Materialien unterschiedlicher akustischer Impedanz gestreut, reflektiert und gebeugt. Aus den detektierten reflektierten Ultraschallsignalen können dann Informationen über das Bauteilinnere abgeleitet werden. Allerdings führen Luftporen, Zuschlagstoffe und Verunreinigungen in den verwendeten Baumaterialien zu einer starken

Schallschwächung. Dies erfordert neben einer effektiven Schallanregung und Schalldetektion auch den Einsatz geeigneter Signalverarbeitungs- und Signalmittelungsverfahren. Hier ist insbesondere die Synthetische Apertur Fokus Technik (SAFT) zu nennen, die in der Regel zu einer wesentlichen Verbesserung des Signalrauschverhältnisses führt [3,4].

Die Prüfung von Fahrbahnen wird zusätzlich durch die Größe der zu prüfenden Flächen und den zwangsläufig anfallenden riesigen Datenmengen erschwert. Außerdem müssen automatisierte Scannersysteme unter der Randbedingung einer leichten Handhabung entwickelt werden, sodass in der Regel ein Kompromiss zwischen Scannerlänge und der damit verbundenen Rüst- und Prüfzeit eingegangen werden muss. Abbildung 1 zeigt ein solches System im Einsatz.



Abbildung 1: Automatisiertes Scannersystem auf einer Fahrbahnplatte (Quelle: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) [4])

II Array-Prüfwalzen und Multimode-Prüftechnik

Aufgrund der Grobstruktur der zu prüfenden Werkstoffe muss mit relativ niedrigen Prüffrequenzen gearbeitet werden: je nach Größe der Zuschlagstoffe empfiehlt sich eine Frequenz zwischen 25 kHz und 100 kHz. Ein ausreichendes Signal-/Stör-Verhältnis ist dabei nur mit einem Sende-Empfangs-Betrieb zu erzielen. Das Prüfkonzept sieht deshalb den Einsatz eines Prüfwagens vor, der im Wesentlichen aus zwei hintereinander angeordneten Prüfwalzen aufgebaut ist. Die vordere Walze enthält ein Sende-Array, die hintere Walze ein baugleiches

Empfangs-Array; Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau. Die jeweils 16 Einzelschwinger dieser Linear-Arrays sind entlang einer parallel zur Walzenachse verlaufenden Geraden angeordnet. Die Schallbündelachsen der Array-Elemente zeigen senkrecht nach unten auf die Kontaktflächen der Walzen mit der Fahrbahn. Die Walzenlauflächen selbst sind aus einem verschleißfesten Gummi aufgebaut und werden ständig mit fließendem Wasser als Koppelmedium benetzt. Die Schallübertragung im Walzeninnenraum erfolgt über eine Wasserfüllung. Aufgrund der niedrigen Prüffrequenzen/großen Wellenlängen und der in Laufrichtung relativ geringen Abmessungen der Kontaktflächen ergeben sich im Beton relativ große Öffnungswinkel der Sende- und Empfangscharakteristiken. Durch Variation des Walzenabstandes kann die Tiefenlage der Empfindlichkeitszone dem gewünschten Inspektionsbereich angepasst werden.

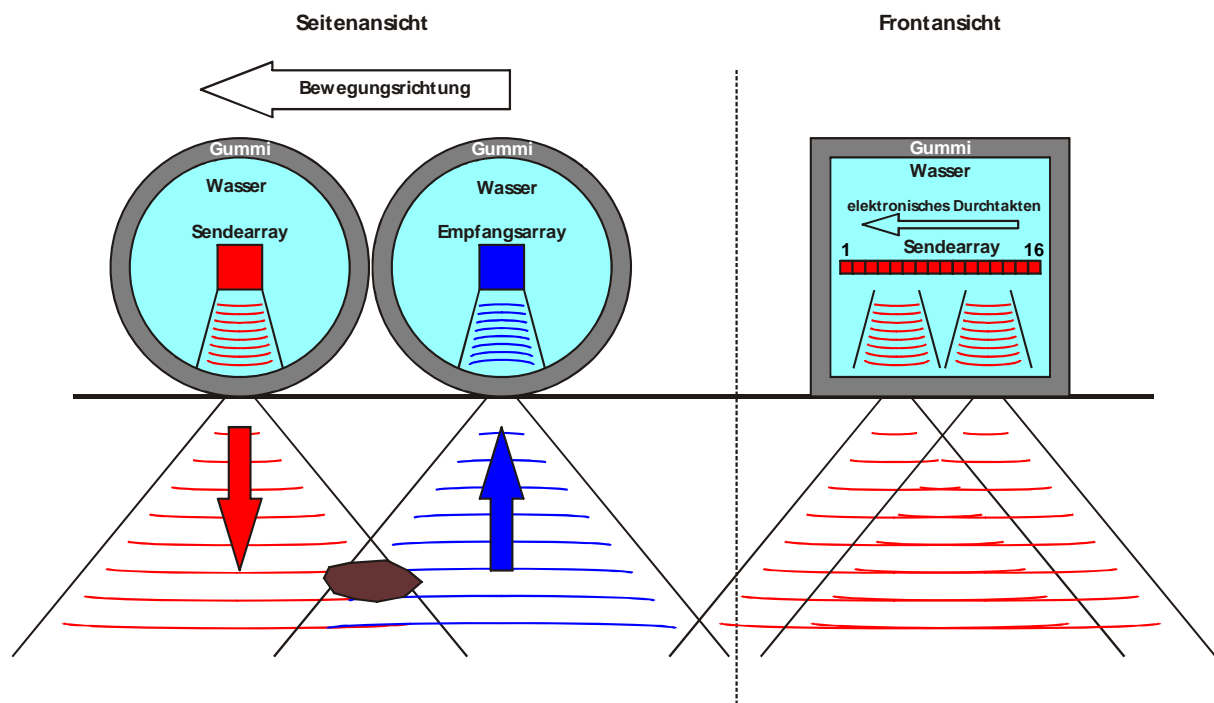


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Anordnung der beiden Prüfwalzen.

Die Aufzeichnung der Prüfpositionen in Fahrtrichtung des Prüfwagens erfolgt durch einen Weggeber. Das Prüfkonzept sieht vor, dass die Einzelschwinger des Sendearrays nacheinander einzeln angeregt werden; der Empfang der Echosignale erfolgt parallel mit allen 16 Einzelschwingern des Empfangsarrays, wie in Abbildung 3 dargestellt. Auf diese Art und Weise werden in jeder Position des Prüfwagens 16 x 16 Empfangssignale erfasst und über die Weggeberdaten der jeweiligen Prüfposition zugeordnet.

Dieses Konzept erlaubt aber auch noch weitere Prüfmodi. So können auch mehrere Einzelelemente zu Sende- bzw. Empfangsgruppen zusammengefasst und damit Variationen in den Richtcharakteristiken und im Energieeintrag durchgeführt werden. Die Verarbeitung der Empfangsdaten erfolgt mit dem

SAFT-Verfahren mit dem Ziel einer dreidimensionalen Darstellung des geprüften Volumens.

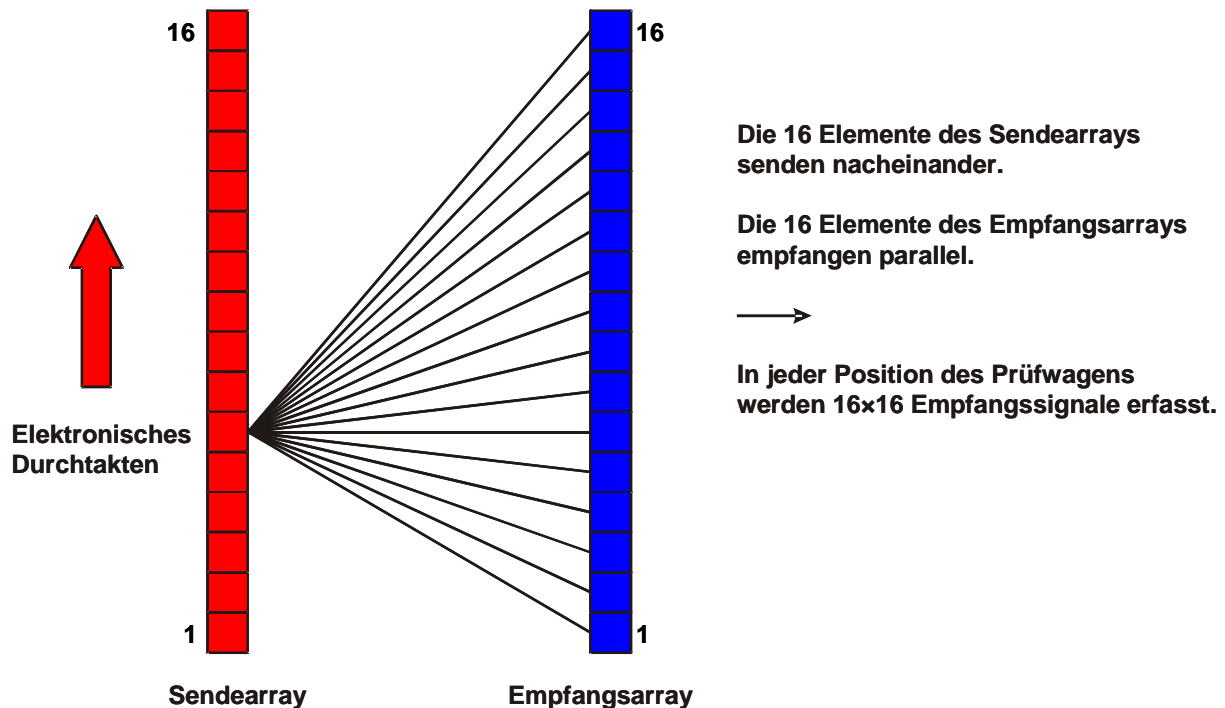


Abbildung 3: Prinzip der Kombination von Sende- und Empfangselementen. Zusätzlich können mehrere Sendeelemente zu größeren Einheiten zusammengefasst werden.

III Eingebettete Prüftechnologie – Aufnahme, Transport und Aufbereitung der Prüfdaten

Die prüftechnischen Randbedingungen bei der Inspektion von Fahrbahnen wie z.B. kurze Rüstzeit der Gesamtapparatur, hohe Prüfgeschwindigkeit und On-Line-Auswertung der aufgenommenen Ultraschalldaten erfordern ein sehr robustes Prüfsystem in Kombination mit einer modernen Elektronik nach dem Stand der Technik.

Durch die Trennung der Ultraschallsensorik in ein Sende- und ein Empfangsarray kann auch der ultraschallspezifische Geräteteil in mehrere Module aufgeteilt werden. Die Aufteilung in Frontend- und Backendeinheit garantiert dabei einen flexiblen und kostengünstigen Aufbau. Durch die Vernetzung der Einheiten mittels USB-Schnittstellentechnik (Universal Serial Bus), Ethernet, SSI-Schnittstelle (Synchron Serial Interface) oder einer speziellen LINK-Schnittstelle gelingt es, die Systeme als intelligente, autonome Module zu realisieren, die zudem über Protokolle leicht zu programmieren und zu steuern sind. Darüber hinaus können in sich geschlossene Systemmodule bei Bedarf leichter ausgetauscht werden, was den Service erheblich erleichtert.

Das Prüfsystem besteht aus mehreren intelligenten, autonomen Subsystemen:

- einem 16-Kanal Sendesystem mit der Möglichkeit der Steuerung von Untergruppen;
- einem 16-Kanal Empfangssystem, ebenfalls mit der Möglichkeit der Steuerung von Untergruppen;
- einem 16-kanaligen, parallelen Datenerfassungssystem mit einer intelligenten Vorverarbeitungseinheit, Datenspeicher und Systemprozessor;
- einer Verarbeitungseinheit für die Detektion der Fahrbahnkoordinaten und einer Schnittstelle für die Ankopplung an die Robotereinheit.

Als Beispiel für ein 16-Kanal Ultraschallempfangsgerät, das für die vorliegende Prüfaufgabe geeignet ist, zeigt Abbildung 4 das am IZFP entwickelte System ADAPT-US [5].

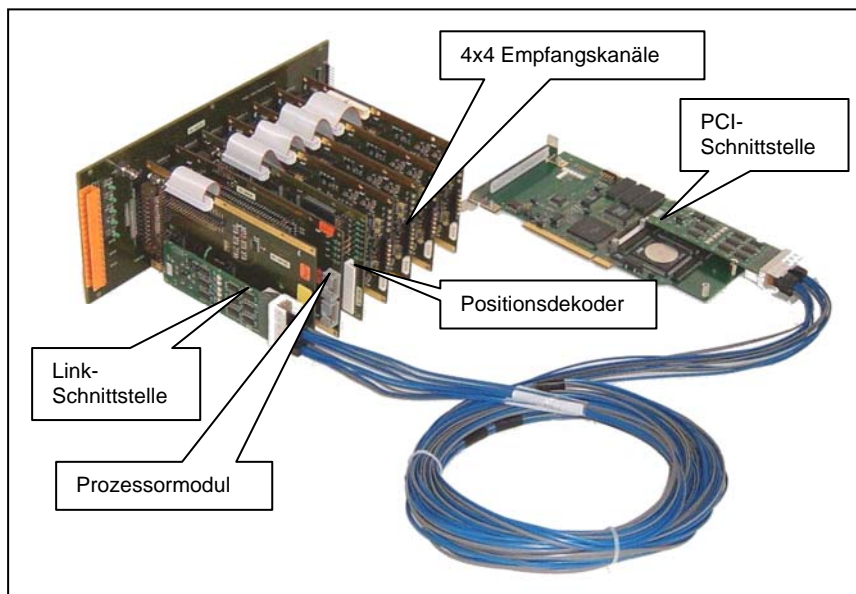


Abbildung 4: Prüfsystem für den Empfang der Ultraschallsignale inklusive PCI-basierter Programmier- und Kommunikationsschnittstelle.

An Stelle der gezeigten PCI-basierten Schnittstelle für die Parametrierung und die Steuerung des Empfangssystems kann auch eine USB2.0-Schnittstelle integriert werden. Dies erlaubt die Steuerung des Empfangsteils über einen kompakten Industrie-PC, der auf einer Geräteplattform auf dem Robotersystem integriert ist. Das Prüfsystem ist durch nachrüstbare Filter auf eine untere Grenzfrequenz von bis zu 20 KHz einstellbar und damit für den angestrebten Frequenzbereich sehr gut geeignet. Durch die Integration einer Positionierschnittstelle kann die aktuelle Position über entsprechende Sensoren leicht in den digitalen Datenstrom der Ultraschallsignale integriert werden. In ähnlicher Weise wird das autonome Sendemodul in das Gesamtsystem integriert.

Eine vergleichbare Sendeeinheit mit bis zu 256 Kanälen – ebenfalls am IZFP entwickelt - zeigt Abbildung 5. Das Sendemodul wird per SSI an das Empfangssystem angedockt und dabei mit den entsprechenden Informationen für das Multiplexen der Sendekanäle versorgt.

Die empfangenen Ultraschallsignale werden digitalisiert, vorverarbeitet und dem auf der Geräteplattform integrierten PC gespeichert. Parallel werden die Prüfdaten zusammen mit Kontrollfunktionen über eine Funk-Schnittstelle an einen Masterrechner übergeben, der - unabhängig vom eigentlichen Messvorgang - die Datenauswertung mittels SAFT-Verfahren durchführen kann. Über die Funk-Schnittstelle wird auch das Roboterfahrzeug kontrolliert und gesteuert.

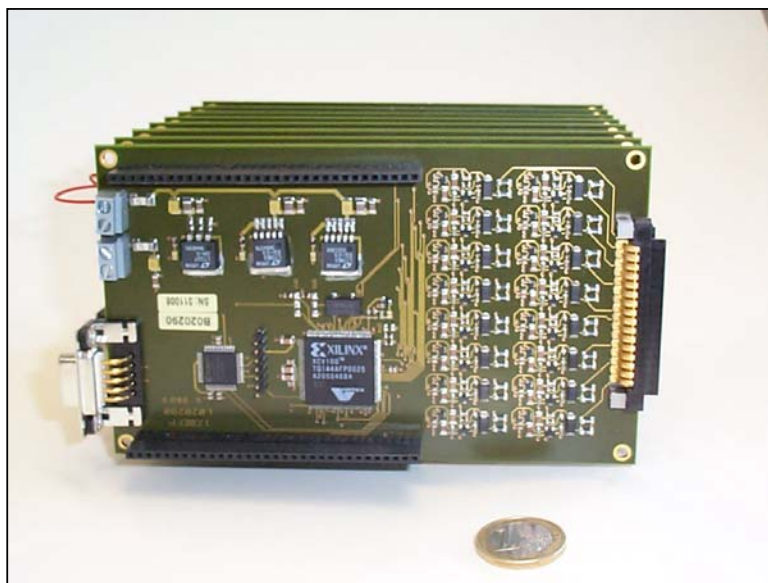


Abbildung 5: Beispiel für ein autonomes Sendesystem mit 32 Sendeschaltern pro Karte.

IV Autonome Robotersysteme

Das in der AG Robotersysteme an der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelte Outdoor-Fahrzeug Ravon (Robust autonomous vehicle for offroad navigation) ist hervorragend für die Integration der Ultraschall-Prüftechnologie geeignet (siehe auch [6] und [7]). Die Vorteile gegenüber einem Scannersystem (wie z.B. in Abb. 1 gezeigt) liegen im Wegfall der Rüstzeiten, dem flexibleren Einsatz bei beliebigen Fahrbahnbedingungen und in der größeren Reichweite.

Das Outdoor-Fahrzeug Ravon ist ein Robotersystem mit vier über Elektromotoren angetriebenen Rädern. Die hohe Flexibilität des Fahrzeugs wird dadurch erreicht, dass die Hinter- und Vorderachse unabhängig voneinander gelenkt werden können (Abbildung 6). Die Stromversorgung erfolgt über 8 Bleiakkus, die eine Fahrzeit von etwa 4 Stunden ermöglichen. Mit einer Länge von 2,4 m, einer Breite von 1,4 m und einem Gewicht von etwa 350 kg erreicht Ravon eine maximale Steigungsfähigkeit von 100 % und eine Höchstgeschwindigkeit von

etwa 10 km/h, und kann daher auch in rauem Gelände eingesetzt werden. Die Zuladung beträgt über 100 kg.

Zur Steuerung des Fahrzeugs ist ein Pentium-4-PC mit einer Taktfrequenz von 2,4 GHz in einem Industriegehäuse in das Fahrzeug integriert. Die Rechnerarchitektur ist so aufgebaut, dass sie um weitere PC-Einheiten erweitert werden kann. Der Vorteil besteht darin, dass die Auswertung der über das Prüfsystem aufgenommenen Messwerte auf einem separaten Rechner durchgeführt werden kann, um beispielsweise Echtzeitanforderungen zu erfüllen.



Abbildung 6: Das autonome Outdoor-Fahrzeug Ravon bei einer Testfahrt in rauem Gelände.

Das Sensorsystem von Ravon umfasst neben Rad-Encodern, Beschleunigungssensoren und Neigungssensoren auch ein Stereo-Kamera-System, das sowohl zur Berechnung von Abstandsbildern als auch zur Texturanalyse eingesetzt werden kann. Die Abstandsbilder werden im Wesentlichen für kollisionsfreies Fahren sowie für die Erkennung von Vertiefungen und Unebenheiten der Fahrbahn verwendet. Über die Texturanalyse werden erste Hypothesen bezüglich der Fahrbahnbeschaffenheit gebildet. Für die Unterstützung zusätzlicher Sicherheitsaspekte sind ein Laser-Scanner und ein Bumper integriert. Die globale und lokale Lagebestimmung des Fahrzeugs wird mittels einer Fusion von DGPS-Daten, einem Inertialsystem und der Rad-Odometrie ermittelt. Hiermit können beispielsweise Karten erstellt werden, in die mit exakter Position und Lage eventuell vorhandene Defekte der Fahrbahn eingetragen werden können.

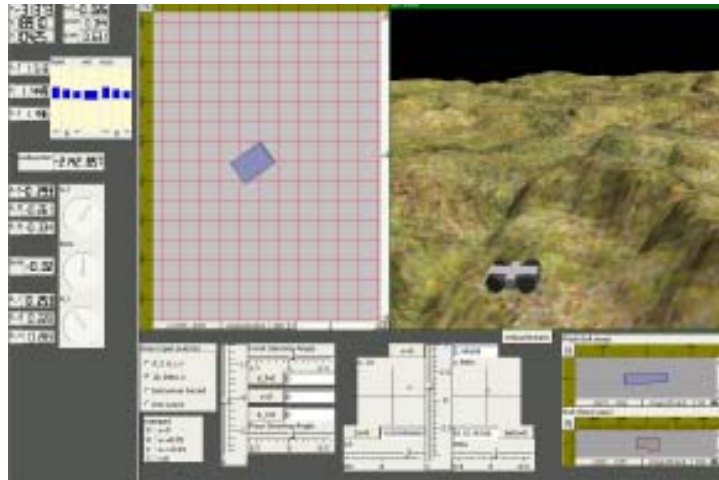


Abbildung 7: Generische, graphische Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Interaktion mit Ravon

Als Steuerungsarchitektur wurde eine verhaltensbasierte Steuerung aufgebaut. Die aktuell implementierten Verhaltensmuster erlauben eine sichere, kollisionsfreie Fahrt auch bei rauem Gelände, sowie ein Anfahren beliebiger Zielpunkte unter Berücksichtigung beliebiger Störungen (z.B. das Wegrutschen von Ravon). Die verhaltensbasierte Steuerung kann einfach um entsprechende Inspektionsverhalten erweitert werden. Die Steuerung von Ravon wurde mit Hilfe von MCA2 (Modular Control Architecture) realisiert. MCA2 stellt unter anderem einige Monitore und unterschiedliche Eingabewerkzeuge zur Verfügung, um komplexe Mensch-Maschine-Schnittstellen aufbauen zu können (Abb. 7). Vor allem die Monitore, die zur Darstellung von B-Scans und C-Scans verwendet werden können, ermöglichen eine einfache Darstellung der Prüfergebnisse.

V Fazit

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept eines Inspektionsfahrzeugs zur schnellen, autonomen Fahrbahnprüfung kombiniert vorhandene, in unterschiedlichen Bereichen bereits erprobte Technologie [5-8]. Die problemspezifische Anpassung und Weiterentwicklung der Sensorik und der Prüfelektronik, sowie die Multimode-Array-Prüftechnik im Zusammenspiel mit dem SAFT-Auswertalgorithmus bergen erhebliches Potential für eine verbesserte Prüfung von Bauwerkstoffen. Im Hinblick auf die Prüfung von Fahrbahnen stellt der Einsatz dieser Prüftechnologie mit dem autonomen Fahrzeug Ravon als Manipulationsplattform einen wesentlichen Fortschritt gegenüber dem Einsatz von mechanischen Scannersystemen dar.

Literatur

- [1] J. Henschen, M. Krause, S. Leipold: Verfahrenskombination bei der Bauwerksdiagnose; DGZfP-Berichtsband 66 CD, 95-105 (1999)
- [2] H. Wiggenhauser, A. Taffe: Anwendungsgebiete der ZfP im Bauwesen; in: E. Cziesielski (Hrsg.) Bauphysik Kalender 2004, Ernst und Sohn, Berlin (2004)
- [3] M. Schickert, M. Krause, W. Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique; Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 15, 235-246 (2003)
- [4] D. Streicher, H. Wiggenhauser, R. Holst, P. Haardt: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen; Beton- und Stahlbetonbau, 100, 216-224 (2005)
- [5] P. Kreier, H. Rieder: Neuartiges Kompakt-Phased-Array-Prüfsystem auf der Basis eines Embedded Systems und Diskussion des flexiblen Anwendungsspektrums; DGZfP-Berichtsband 89 CD, V51 (2004)
- [6] M. Proetzsch, T. Luksch, K. Berns: Fault-Tolerant Behavior-Based Motion Control for Offroad Navigation; 20th IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) - Barcelona, Spain April (2005)
- [7] H. Schäfer, M. Proetzsch, K. Berns: Extension Approach for the Behaviour-Based Control System of the Outdoor Robot RAVON, Autonome Mobile Systeme, Springer Verlag (2005)
- [8] M. Spies, W. Gebhardt, H. Rieder: Boosting the Application of Phased Arrays; AIP (Woodbury, NY), AIP Conference Proceedings 615, 847-854 (2002)