

II/3 ORDOSYS – Erkundung des unterirdischen Bauraumes mittels Radar

Dr. Peter Peyerl, Dr. Jürgen Sachs, Dr. Thomas Richter und Jens Arnold

1. Einleitung

Die effektive Beschaffung von Informationen über den tatsächlichen Zustand der wirtschaftlich genutzten Bereiche der oberen Erdschichten (typisch bis etwa 2 m Tiefe, maximal 4 - 6 m) ist von großem wirtschaftlichem Interesse. Infolge von Bauaktivitäten sind fehlende, unvollständige oder falsche Lage- und Bestandspläne für Ver- und Versorgungsleitungen der unterschiedlichen Medien eine häufige Ursache von Havarien, die den Tiefbau- und Versorgungsunternehmen zunehmend steigende Kosten verursachen und Schäden am Image zufügen. Planung und Verlegung neuer Kabel- und Rohrleitungstrassen könnten außerdem wesentlich beschleunigt, kostensparender und verkehrsverträglicher ausgeführt werden, wenn diese Informationen vorhanden wären.

Derzeit existiert jedoch noch keine die Tiefbau- und Versorgungsunternehmen befriedigende Lösung, was Robustheit und Handhabbarkeit der Erkundungstechnik, Aussagekraft der Erkundungsergebnisse und deren Einbindung in ein durchgängiges Dokumentations- und Planungswerkzeug betrifft. Im Rahmen des Thüringer Forschungsprojektes ORDOSYS (**O**rtungs- und **D**okumentationssystem für unterirdisch verlegte Leitungen) sollten Möglichkeiten untersucht werden, wie diese Probleme überwunden werden können. Als für den Anwender wichtige Einsatzkriterien stellten sich folgende Punkte heraus:

- ∄ Erfassung der im Untergrund verborgenen Leitungen, Rohre und anderer Hindernisse im Trassenverlauf mit zuverlässigen, zerstörungsfreien Methoden
- ∄ Charakterisierung des Oberflächenaufbaus entlang der Trasse
- ∄ Erfassung des strukturellen Aufbaus der Erdschichten, Bodenklassifizierung
- ∄ Positionsvermessung der Trasse während der Erkundung
- ∄ Verwaltung der Ergebnisse in Datenbanken und GIS
- ∄ Berechnung bauwirtschaftlich relevanter Größen auf der Basis des GIS.

Für das Projekt ergaben sich daraus drei Arbeitsschwerpunkte:

1. Verbesserung der Erkundungsmethodik,
2. Realisierung einer kontinuierlichen Positionsbestimmung und Vermessung sowie
3. eine durchgängig automatisierte Verwaltung und Auswertung der erfassten Daten.

Der technisch anspruchsvollste Teil ist und bleibt die Erkundungsmethode. Es wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten bewertet. Nach heutigem Erkenntnisstand ist das Geo-Radar das einzige erfolgversprechende Prinzip. Im Folgenden wird deshalb hauptsächlich auf diese Variante der unterirdischen Erkundung eingegangen und das ORDOSYS-Gesamtkonzept vorgestellt.

2. Das Geo-Radar-Prinzip

Das Prinzip des Radars ist seit langem bekannt. Typische Anwendungen sind die Überwachung des Luftraumes, die Bewegung von Schiffen und Fahrzeugen. Die Funktionsweise des Radars basiert auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die von einer Antenne ausge-

sandt werden und die sich dann mit Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s) fortpflanzen. Treffen diese Wellen auf ein Hindernis (z. B. Flugzeug), werden sie reflektiert und kehren zur Antenne zurück. Anhand der Laufzeit der Welle kann auf die Entfernung des Objektes geschlossen werden.

Beim Georadar nutzt man noch eine zweite Eigenschaft dieser Wellen. Diese besteht darin, dass sie in der Lage sind, nichtmetallische Körper wie z. B. das Erdreich oder Mauerwerk zu durchdringen. Das kann dann benutzt werden, um vergrabene Objekte zu detektieren.

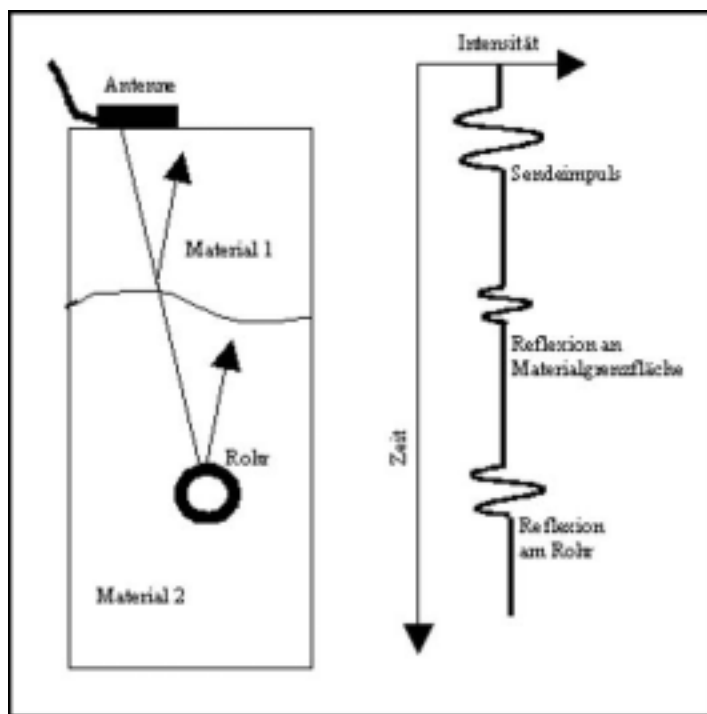


Bild 1: Grundprinzip des Geo-Radars. Von einer Antenne wird eine sehr kurze impulsförmige Welle ausgesandt. Gelangt diese an eine Grenzschicht oder ein vergrabenes Objekt, wird sie reflektiert und kann von einem Messgerät detektiert werden. Die dabei zu analysierenden Zeitvorgänge liegen im Bereich einer milliardstel Sekunde. In Anlehnung an die Ultraschalltechnik wird eine einzelne Messkurve wie im hier gezeigten Fall vielfach auch als A-Scan bezeichnet.

Im **Bild 1** ist das Grundprinzip des Geo-Radars dargestellt. Eine Reflexion der Welle tritt immer an Grenzflächen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften wie z. B. der Dielektrizitätszahl oder der Leitfähigkeit auf. Damit sind also prinzipiell Bodenschichtungen, Bodeneinschlüsse usw. detektierbar, solange sich angrenzende Objekte z. B. in ihrer Dielektrizitätszahl κ unterscheiden. Gibt es diesen Unterschied nicht bzw. ist er zu gering, versagt das Geo-Radar prinzipbedingt. In den meisten technisch relevanten Fällen sind jedoch hinreichende Unterschiede festzustellen, so dass mit dem Geo-Radar die Nachweismöglichkeit von metallischen und nichtmetallischen Objekten gegeben ist. Die technische Herausforderung bei diesem Verfahren im Vergleich zu den üblichen Radaren besteht dabei in seiner wesentlich höheren Auflösung und Genauigkeit. Denn die zu detektierenden Objekte sind tausendfach kleiner und ihre Entfernung ist tausendmal geringer als das z. B. bei Flugzeugen der Fall ist.

Die praktische Vorgehensweise bei der Erkundung mittels Geo-Radar besteht darin, dass man die Antenne entlang einer Linie über das zu untersuchende Gebiet führt und dabei ständig Messungen durchführt. Die Messkurven werden nebeneinander aufgezeichnet, so dass daraus ein Radargramm bzw. B-Scan entsteht. **Bild 2** zeigt ein vereinfachtes Beispiel für den Fall eines punktförmigen Objektes. Unter anderem ergibt sich ein solches Bild auch, wenn die Antenne quer über eine Leitung bewegt wird. Damit kann ein hyperbolisches Erscheinungsbild im Radargramm das Anzeichen einer Leitung sein. Das bedeutet, dass zum Verfolgen einer Rohrleitungsstrasse ein aufwendiges mäanderförmiges Abfahren der vorgegeben Fläche notwendig ist, um deren Verlauf rekonstruieren zu können (**Bild 3**).

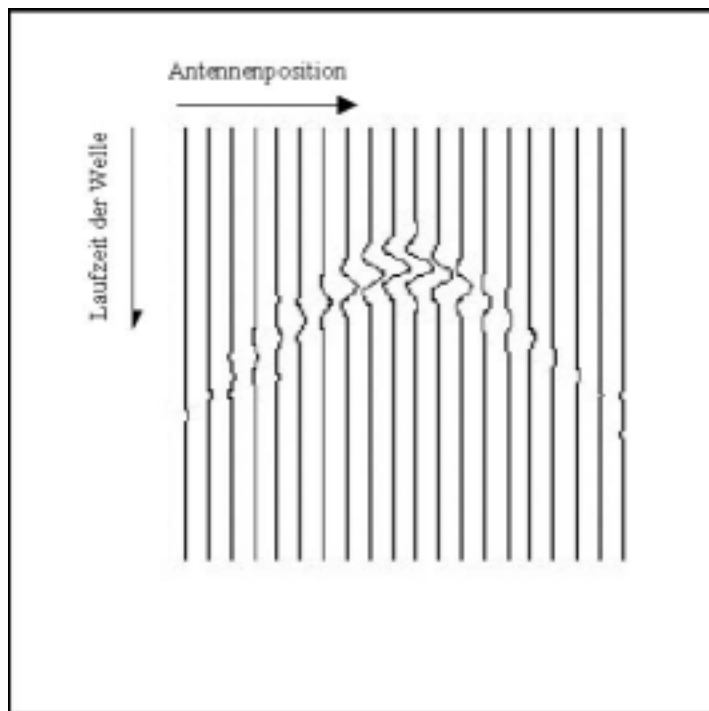


Bild 2: Entstehung eines (idealierten) Radargramms aus einer Vielzahl von Messungen. Diese Darstellung wird als Wiggel-Plot bezeichnet. Heute ist sie kaum mehr üblich. Sie wird meist durch eine Falschfarbendarstellung ersetzt, bei der die Amplitudenhöhe der Messsignale einer Farbe zugeordnet sind.



Bild 3: Traditionelle Verfahrensweise zur Erfassung einer Fläche oder Trasse.

Aus Gründen der Handhabbarkeit müssen die Antennen möglichst klein sein. Physikalisch bedingt senden sie dann aber keinen scharfen Strahl nach unten ab, sondern „schielen“ auch zur Seite. Dadurch werden bereits Objekte erkannt, die noch weitab, seitlich versetzt zur Antenne liegen. Ein punktförmiges Objekt hinterlässt also keinen Punkt im Radargramm, sondern eine Hyperbel (**Bild 2**). Solange nur ein Objekt die Welle reflektiert, ist die Interpretation eines Radargramms kein Problem. Im Allgemeinen überlagern sich aber die Reflexionssignale von Steinen, Rohren und anderen Einschlüssen, so dass häufig ein schwer durchschaubares Radarbild entsteht, das, wenn überhaupt, nur von einem Spezialisten gedeutet werden kann. Durch numerische Nachbearbeitung versucht man, die Daten wieder zu fokussieren, um einen besseren Eindruck zu bekommen.

Bild 4 zeigt ein einfaches Beispiel. Im praktischen Fall gelingt dies gegenwärtig teilweise nur mit mäßigem Erfolg, da die Algorithmen einen homogenen Untergrund mit bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen voraussetzen. Beides ist aber für die Rohrleitungssuche häufig nicht gegeben. Hinzu kommt eine sich verstärkende Dämpfung der Wellen mit zunehmender Tiefe, so dass dünnere Leitungen schwerer nachweisbar werden und eine Fokussierung an Schärfe verliert.

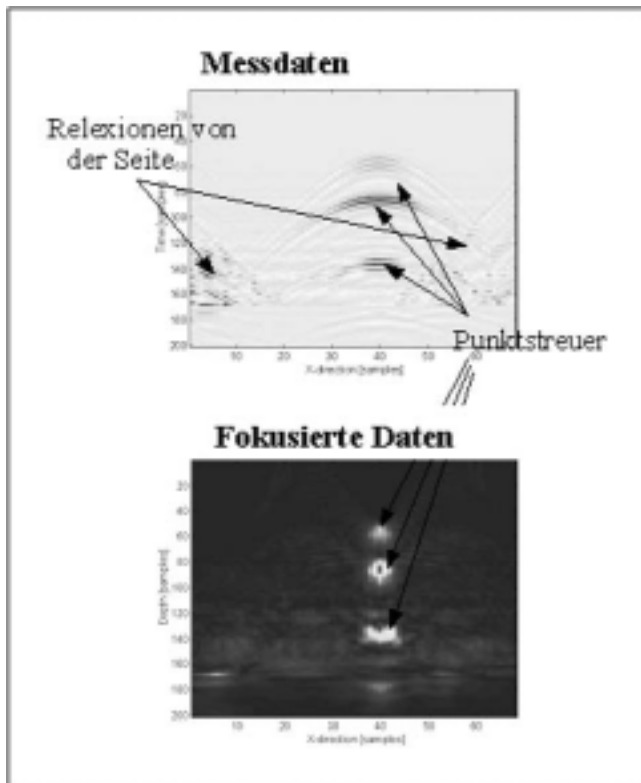


Bild 4: Mit Hilfe von Migrationsalgorithmen kann die Interpretierbarkeit der Radargramme verbessert werden. Dabei werden die hyperbolischen Datenverläufe auf die ursprünglich punktförmigen Verursacher „zurück“-fokussiert. Das Beispiel basiert auf Messungen im Labor.

3. Das ORDOSYS-Radar

Mit der Konzeption des ORDOSYS-Radars wurde versucht, die gegenwärtigen Unzulänglichkeiten des Geo-Radar-Verfahrens durch eine effektivere Messwerterfassung und Datenauswertung zu überwinden. Der Schlüssel zum Erfolg liegt dabei in der Verwendung von so genannten Antennen-Arrays, welche anstelle von Einzelantennen aus einer Vielzahl von Antennen bestehen. **Bild 5** zeigt ein Beispiel eines solchen Arrays. Je nach Breite des Arrays kann somit kontinuierlich ein ganzer Streifen erfasst werden. Daraus ergeben sich eine Reihe von Konsequenzen.



Bild 5: Großes ORDOSYS-Array

Der zunächst offensichtlichste Vorteil liegt in der schnelleren und effektiveren Erfassung der Untergrunddaten. Aber auch bezüglich der Verarbeitung und Interpretation der Messdaten ergeben sich wesentliche Neuerungen.

Zur besseren Verdeutlichung der Leitungsstrukturen wird auch beim ORDOSYS-Radar auf das oben beschriebene Verfahren der Migration zurückgegriffen, jedoch in modifizierter Form. Der wesentliche Unterschied zu bisherigen Verfahren besteht darin, dass die Trasse kontinuierlich im Abstand weniger cm quasi „Scheibe für Scheibe“ erfasst wird. Im Gegensatz zu einem Stein oder einer anderen lokalen Störung, die nur in einer Scheibe oder wenigen Scheiben auftreten, zeichnet sich eine Leitung nun in jeder Scheibe als ein punktförmiges Gebilde ab, aufgereiht wie auf einer Perlenkette. Damit bekommt man auch unter widrigen Messbedingungen noch einen relativ guten Eindruck vom Verlauf der Leitung, wie er mit klassischen Geräten nicht zu erzielen gewesen wäre. Dieser Verlauf kann dann ausgelesen und in eine Karte übertragen werden (vergleiche **Bild 10**).

Jedoch können auch bei dieser Methode Überraschungen auftreten, bei denen die Rohrleitungen scheinbar in ihrer Höhe springen. **Bild 6** soll das verdeutlichen. Es zeigt einen Abschnitt eines aus Radardaten rekonstruierten Leitungsabschnittes. Ursache des Sprunges sind Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften des Einbettungsmaterials der Rohre. Bei der Verfolgung und Fokussierung der Rohre setzt man zunächst bestimmte elektrische Eigenschaften des Bodens voraus. Ändern sich diese plötzlich, wird falsch fokussiert, und die Leitung macht scheinbar einen Sprung. Jedoch kann man im Allgemeinen davon ausgehen, dass dies in der Realität nicht so ist. Damit hat man ein Kriterium den Fokussierungsalgorithmus an die neuen Gegebenheiten (automatisch) anzupassen. Eine Möglichkeit, die mit den klassischen Geo-Radargeräten bisher nicht gegeben ist. Das setzt jedoch voraus, dass die Änderungen nicht zu dicht aufeinander folgen.

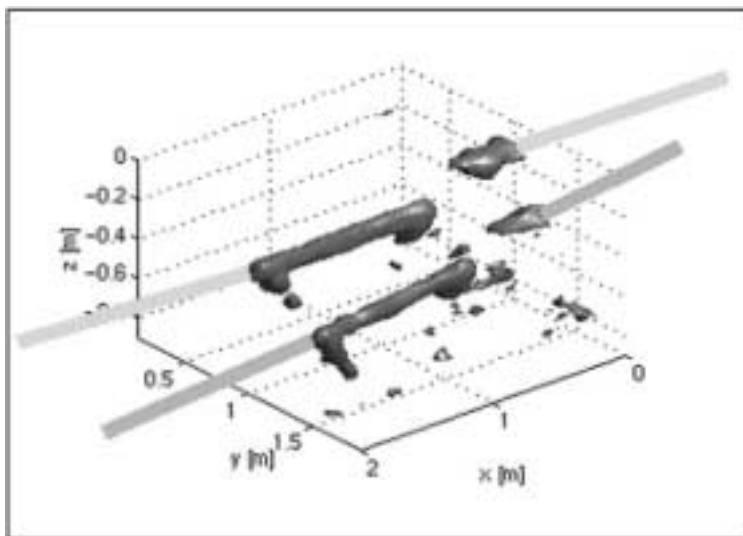


Bild 6: Rekonstruierter Verlauf zweier Rohrleitungen aus einer Vielzahl von Radargrammen. Scheinbar springen die Leitungen in der Höhe. Zur Verdeutlichung des Verlaufes wurden die beiden Leitungen graphisch über die Messwerte hinaus verlängert.

Das gezeigte Beispiel verdeutlicht auch noch ein weiteres Problem. Bei falschen Annahmen der elektrischen Konstanten des Bodens ergeben sich falsche Höhenangaben für die Leitungen. Es ist daher wichtig, dass die elektrischen Parameter des Erdbodens korrekt aus den Messdaten ablesbar sind. Auch hierfür bietet das Array-Verfahren Vorteile gegenüber dem klassischen Prinzip.

Natürlich bedeutet die Anwendung eines Array-Verfahrens auch einen höheren technischen Aufwand, nicht nur an Antennen, sondern vor allem auch an Elektronik. Bezüglich der Antennenauslegung gibt es bei **ORDOSYS** zwei Varianten, die sich äußerlich hauptsächlich durch ihre Größe unterscheiden. Das kleinere Array ist für Anwendungen mit geringer Eindringtiefe, aber hoher räumlicher Auflösung einsetzbar, während das große Array (**Bild 5**) hauptsächlich für die Detektion tieferliegender Objekte gedacht ist. Beide Antennensysteme bestehen aus zwei Reihen zu je sechs Sende- und sechs Empfangsantennen.

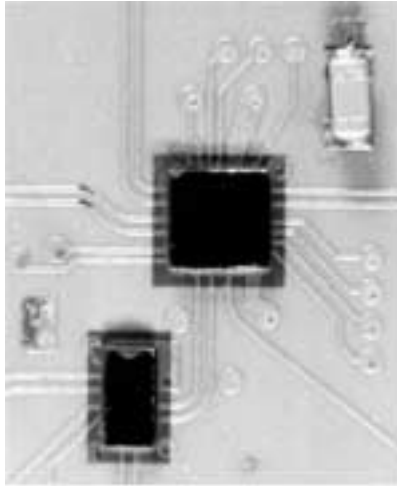


Bild 7: Teil der Radar-Elektronik

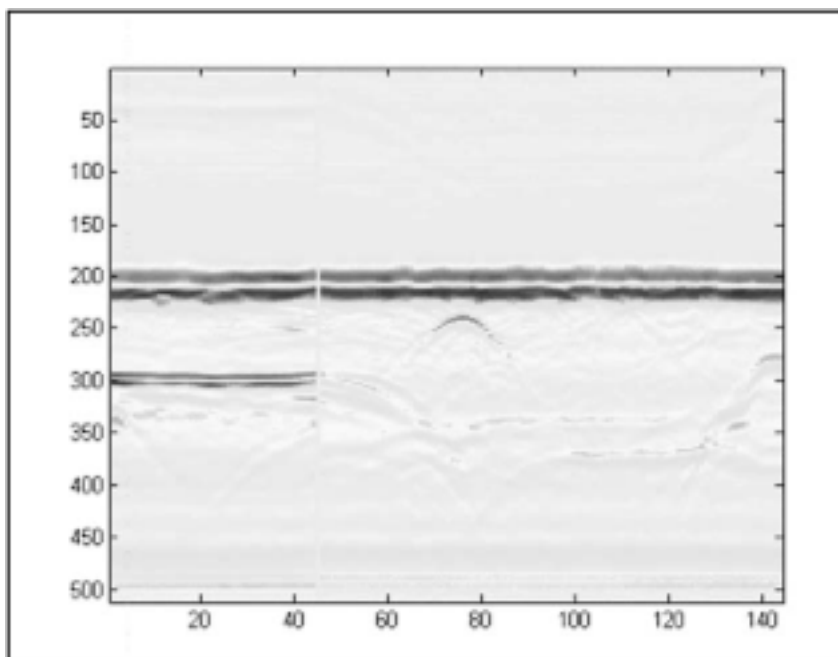


Bild 8: Beispielmessung mit dem großen Array zur Verdeutlichung der Wirkungsweise von Elektronik und Antennen. Die gezeigten Daten wurden noch keiner Signalverarbeitung unterzogen.

Die wichtigste Voraussetzung der technischen Realisierbarkeit eines Antennenarrays war jedoch die Entwicklung einer neuartigen Elektronik, die vielkanalfähig, in ihren Eigenschaften stabil und sehr robust sein musste. Das dabei verwendete Schaltungs- und Wirkprinzip ist neu und wurde weltweit patentiert. **Bild 7** zeigt eine Teilkomponente der ORDOSYS-Elektronik, und **Bild 8** vermittelt einen Eindruck der Signalqualität anhand einer Messung.

4. Das ORDOSYS-System

Die Struktur des ORDOSYS-Systems beschreibt eine durchgängige Organisation der Datenerfassung, Speicherung, Visualisierung und Dokumentation (**Bild 9**). Ziel ist die Vereinheitlichung und Automatisierung des gesamten Erkundungs-, Vermessungs- und Dokumentationsablaufes.

Die Daten innerhalb des ORDOSYS werden von einem Radar-System für die Erkundung, einem Positionier- und Vermessungssystem sowie einem optischen Bilderfassungssystem geliefert. Diese Daten bilden die Online-Datenbasis, die schritthaltend mit dem Messablauf erweitert wird. Das Positioniersystem von ORDOSYS ist zweistufig ausgelegt. Zur Gewinnung der Absolutpositionen dient ein Tachymeter. Moderne Geräte bieten die Möglichkeit der

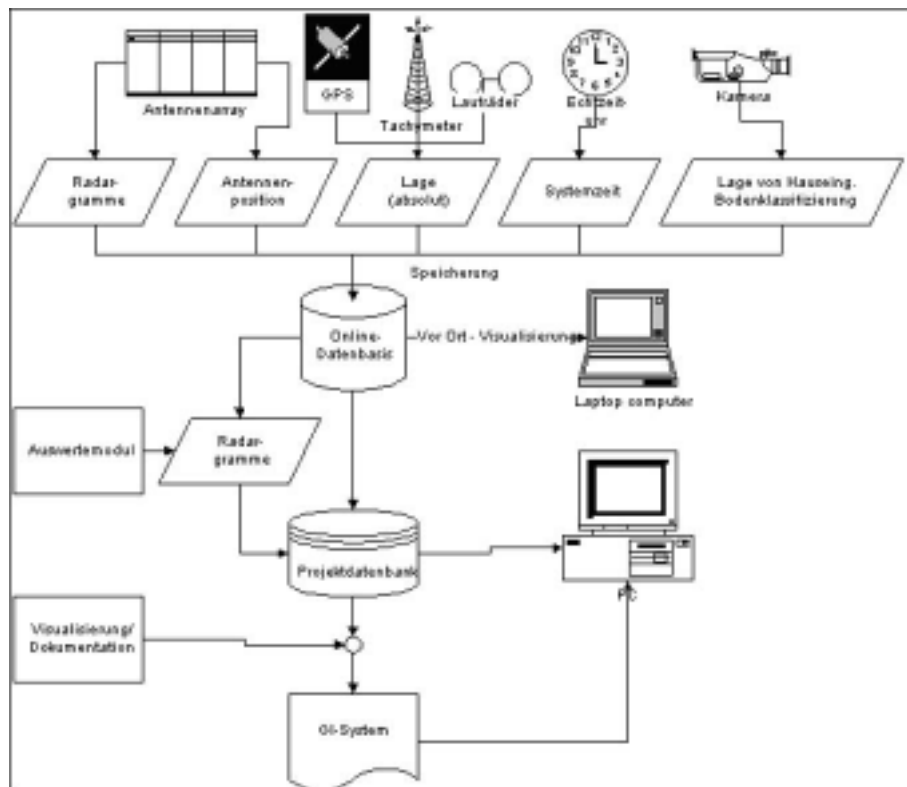


Bild 9: ORDOSYS-Datenfluss

motorgetriebenen Nachführung bezüglich eines 360°-Prismas, welches sich auf der bewegten Antenneneinheit befindet. Mit dem Tachymeter wird die Absolutposition in Abständen von ca. 4 m gemessen. Dazwischen erfolgt die Erfassung der relativen Bewegung über zwei Lauf­räder.

Nach Abschluss einer Messkampagne werden die Daten über FTP in einer Projekt­datenbank abgelegt. Die Projekt­datenbank dient der Organisation und Verwaltung der anfallenden Daten­mengen sowie der Dokumentation der Bearbeitungsschritte bzw. des aktuellen Bear­beitungs­standes. Alle Dateinamen werden automatisch vergeben. Der Bezug zu den Projek­ten und deren Messreihen ist aus dem jeweiligen Dateinamen zu erkennen. Damit ist eine opti­male Transparenz und ein optimaler Zugriff zu den Daten unabhängig von der aktuel­len Ver­fügbarkeit eines bestimmten Bearbeiters gewährleistet.

Eine wesentliche Aufgabe des Gesamtsystems am Ende des Bearbeitungsvorganges ist die Dokumentation und Visualisierung der anfallenden Ortungs- und Bilddaten. Diese Daten sollen geeignet mit vorhandenen geographischen Informationen (Bestandsplänen, Katasterkar­ten, topographischen Karten) verknüpft werden. Als Basis der Dokumentation bieten sich ge­eignete Geoinformationssysteme an. Ein Geoinformationssystem ist in der Lage, Sach- und Geometriedaten in ihren komplexen, logisch-inhaltlichen und räumlichen Zusammenhängen zu erfassen und zu verwalten sowie darüber hinaus über räumliche Analyse­möglich­keiten neue Informationen zu generieren. Damit ist es z. B. möglich, Trassenverläufe mit spezi­fi­schen Zusatzinformationen zu versehen. Am Beispiel der Einbindung von Fotogra­fien wie im **Bild 10** kann die Flexibilität der Einbeziehung solcher Zusatzinformationen verdeutlicht wer­den.

5. Zusammenfassung

Das ORDOSYS-System stellt eine einheitliche Struktur aus Erkundung, Positionierung / Vermessung und Datenverwaltung dar. Es handelt sich um ein Experimentalsystem, mit dem

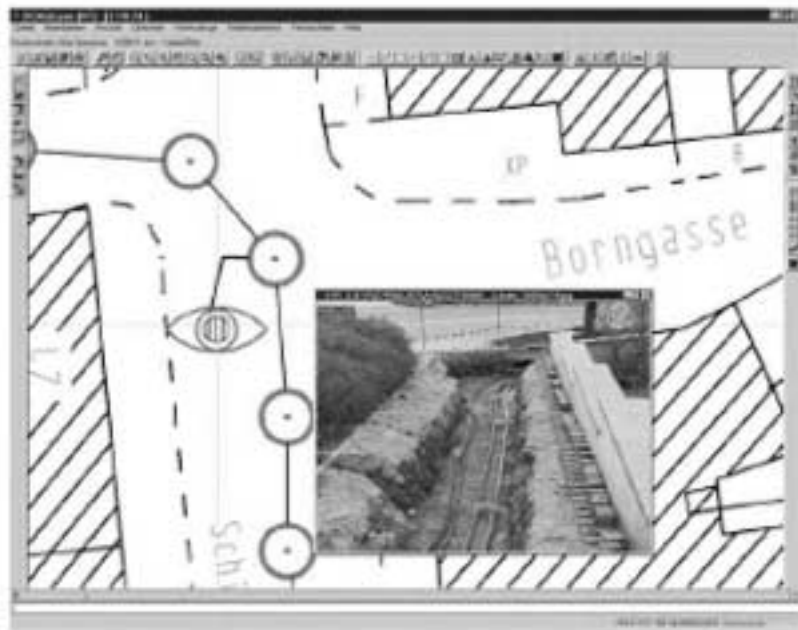


Bild 10: Möglichkeit der Darstellung eines Trassenverlaufes im System SICAD. Die Linie gibt den Leitungsverlauf an. Über Symbole („Auge“) kann eine Verknüpfung zu einem Foto hergestellt werden.

wichtige Erkenntnisse für die praxiswirksame Umsetzung eines derartigen Gerätekonzeptes gewonnen werden können.

6. Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Thüringer Ministers für Wissenschaft, Forschung und Kultur gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Ein besonderer Dank gilt auch den zahlreichen Unternehmen und Verbänden, die das Vorhaben mit einem eigenen finanziellen Engagement und fachlicher Beratung unterstützt haben.

Verfasser:

Dr. Peter Peyerl
 MEODAT GmbH
 Ehrenbergstraße 11
 98693 Ilmenau
 Telefon: (0 36 77) 66 86 45
 Telefax: (0 36 77) 66 86 55
 e-mail: pey@meodat.de

Dr. Jürgen Sachs
 TU Ilmenau
 PF 100565
 98684 Ilmenau
 Telefon: (0 36 77) 69 26 23
 Telefax: (0 36 77) 69 11 13
 e-mail: juergen.sachs@tu-ilmenau.de

Dr. Thomas Richter
 Bo-Ra-tec GmbH
 Hans-Schrader-Straße 11
 99706 Sondershausen

Telefon: (0 36 32) 75 01 07
Telefax: (0 36 32) 70 07 50
e-mail: boratec@t-online.de

Jens Arnold
ILMCAD GmbH
Grenzhammer 10
98693 Ilmenau
Telefon: (0 36 77) 67 80 50
Telefax: (0 36 77) 67 80 80
e-mail: Jens.Arnold@ilmcad.de