

Das Georadar

Aufgabe

Hochauflösendes Verfahren zur Bestimmung von Strukturen oder zur Objektdetektion im Untergrund und im Bauwerk aufgrund der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Seltener: Ermittlung von Materialeigenschaften.

Häufige Anwendungen (siehe Abb. 4 und 5)

Bauwerke

Beton- und Stahlbetonbau (z.B. Brücken, Tunnel, Staubauwerke, Industriebauwerke)

Ziele: *schlafte und Spannbewehrung, Bauteilaufbau (Dicken), Fehlstellen (z.B. Hohlstellen, Kiesnester, Feuchte)*

Mauerwerk (z.B. in historischen Gebäuden)

Ziele: *struktureller Aufbau (Schalen, Dicken), Einbauteile (Klammern, Dübel, Anker, Hölzer), Schadstellen (Risse, Ablösung), Feuchte- und Salzverteilung, Sanierungskontrolle*

Verkehrswege (z.B. Straßen, Gleise)

Ziele: *Schichtdicken (Asphalt, Tragschichten), Schadstellen (Schichtablösungen, Schotterverschmutzungen und -säcke),*

Erdbauwerke (z.B. Dämme)

Ziele: *Struktureller Aufbau, gestörter Aufbau*

Sonstiges

Archäologie

Ziele: *Bauwerksreste, Objektdetektion, verborg. bauliche Situationen*

Kriminalistik

Ziele: *Objektdetektion (verborg. Kammern, verstecktes Gut), Leichen*

Verfahrensgrundlagen

Wellenausbreitung: Das Georadar beruht auf der aktiven Aussendung elektromagnetischer Wellen in ein Medium, meist in Form von Impulsen mit Dominanzfrequenzen im Bereich von ca. 20 MHz bis 2 GHz. Die Wellenausbreitung hängt von den elektrischen Materialeigenschaften ab. Wesentlich hierfür sind die Dielektrizität ϵ und die Leitfähigkeit σ (Die Permeabilität μ spielt in mineralischen Stoffen keine wesentliche Rolle.). Auf seinem Weg wird das Radarsignal an Diskontinuitäten gestreut, reflektiert und gebeugt sowie durch Absorption in hohem Maße geschwächt.

Reflexionsanordnung (siehe Abb. 1): Diese Anordnung wird bei der gängigen Georadarmessung verwendet. Reflexionen finden an Kontrasten v.a. der Dielektrizität ϵ aber auch der elektr. Leitfähigkeit σ statt. Es gilt näherungsweise für den Reflexionskoeffizienten

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Die Wellengeschwindigkeit v ist v.a. von der Dielektrizität ϵ abhängig. Es gilt die Näherung $v = c/\sqrt{\epsilon}$ (c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum). Der Reflektorabstand d (z.B. Objektoberkante) berechnet sich aus der Wellengeschwindigkeit v und der Laufzeit t des Signals zu $d = 1/2t * v$.

Entscheidend für die Radarreichweite ist die Höhe der Leitfähigkeit, welche die Absorption bewirkt. Daneben spielt auch die Signalstreuung durch Inhomogenitäten eine große Rolle. Niederfrequente Signale haben eine größere Reichweite als hochfrequente Signale.

Transmissionsanordnung (siehe Abb. 2): Diese Anordnung wird eher bei Spezialmessungen verwendet. Ziele sind i.a. die Wellengeschwindigkeit bzw. die Dielektrizität und/oder die Signalabsorption zur Charakterisierung von Materialparametern (z.B. Feuchte, Salze) oder Strukturanalysen (z.B. Radartomographie).

Untergrund

Altlasten (z.B. Ablagerungen, Industriebrachen)

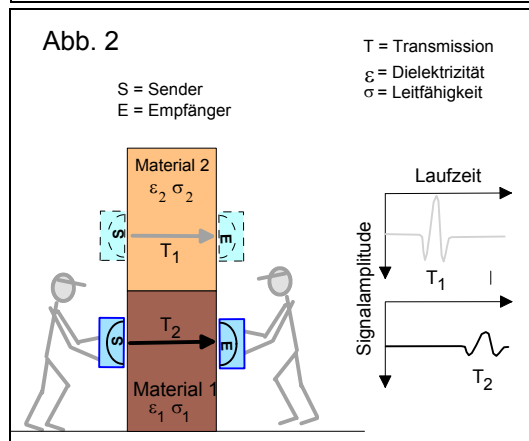
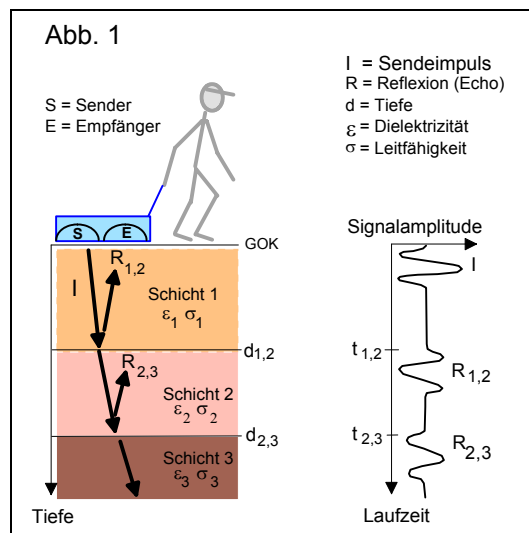
Ziele: *Objekte (Tanks, Fässer)*

Baugrund (z.B. Baugruben, Leitungstrassen)

Ziele: *alte Bauwerksreste, Objekte, Hohlräume, Leitungen)*

Geologie

Ziele: *Hohlräume, Boden- und Sedimentschichten, Wassertiefen und Ablagerungen im flachen Süßwasser*



typische Ausstattung

Signalerzeugung Sende-Empfang-Antennenkombination für geotechnische und ingenieurmäßige Anwendungen, teilweise getrennte Sender und Empfänger für geolog. Fragestellungen und Spezialanwendungen

Signalregistrierung Radarsteuer- und Aufzeichnungseinheit

Auswertungssoftware Auswertesoftware für PC oder Workstation

Personal Meßtrupp und Auswertepersonal (besonders qualifizierte Fachkräfte)

typische Anwendungsart und Datendarstellung (siehe Abb. 3)

Zur Datenaufnahme wird eine Sender-Empfänger-Kombination entlang einer Meßlinie mit möglichst geringem Abstand (wenige cm) über die Meßfläche gezogen. Meist können die Daten dabei am Bildschirm beobachtet werden. In sehr dichter Folge wird gesendet und empfangen, sodaß die Messung entlang der Meßlinie quasi als kontinuierlich bezeichnet werden kann (Meßpunktabstand wenige cm).

Registriert wird die Signalamplitude in Abhängigkeit der Zeit als sog. Signalspur (siehe Abb. 1, Signalspur mit Amplitude als Kurvenauslenkung). Die Amplitude wird meist grauwert- oder farbcodiert dargestellt. Durch Aneinanderreihung der Signalspuren erhält man ein Diagramm, in dem die Entfernung entlang der Meßlinie über der Laufzeit aufgetragen ist. In diesem sog. Radargramm - quasi ein Tiefenschnitt - zeigen sich die reflektierenden Strukturen als mehr oder weniger starke Signale.

Im allgemeinen überwiegt bei Georadar die Betrachtung von nahezu vertikal ausgesandten und reflektierten Signalen, jedoch erlaubt eine räumliche Trennung von Sender und Empfänger die Aufzeichnung von unter unterschiedlichen Winkeln reflektierten Signalen oder die Durchstrahlung des Untersuchungsobjektes.

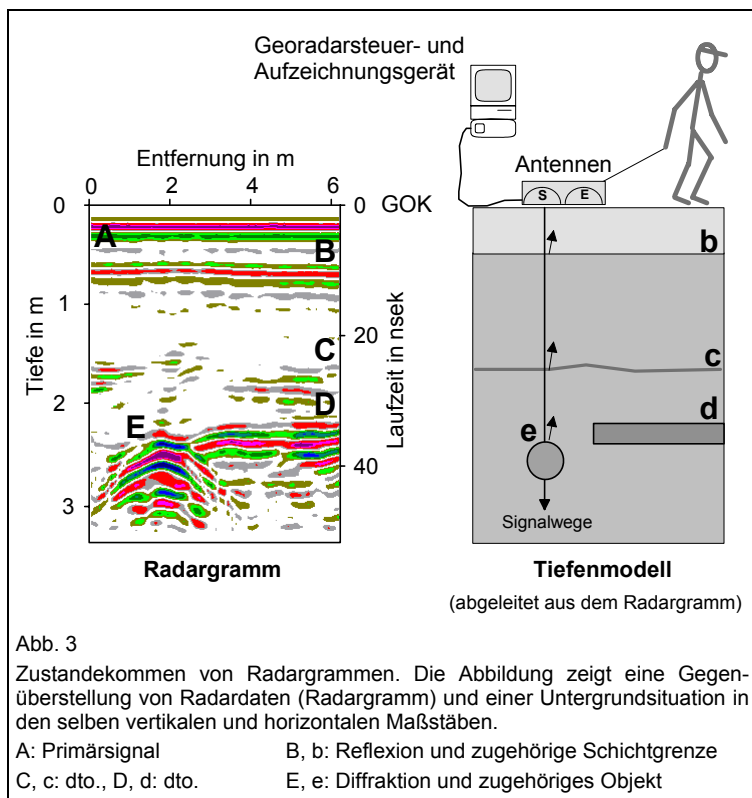


Abb. 3

Zustandekommen von Radargrammen. Die Abbildung zeigt eine Gegenüberstellung von Radardaten (Radargramm) und einer Untergrundsituation in den selben vertikalen und horizontalen Maßstäben.

A: Primärsignal B, b: Reflexion und zugehörige Schichtgrenze
C, c: dto., D, d: dto. E, e: Diffraktion und zugehöriges Objekt

Reichweite

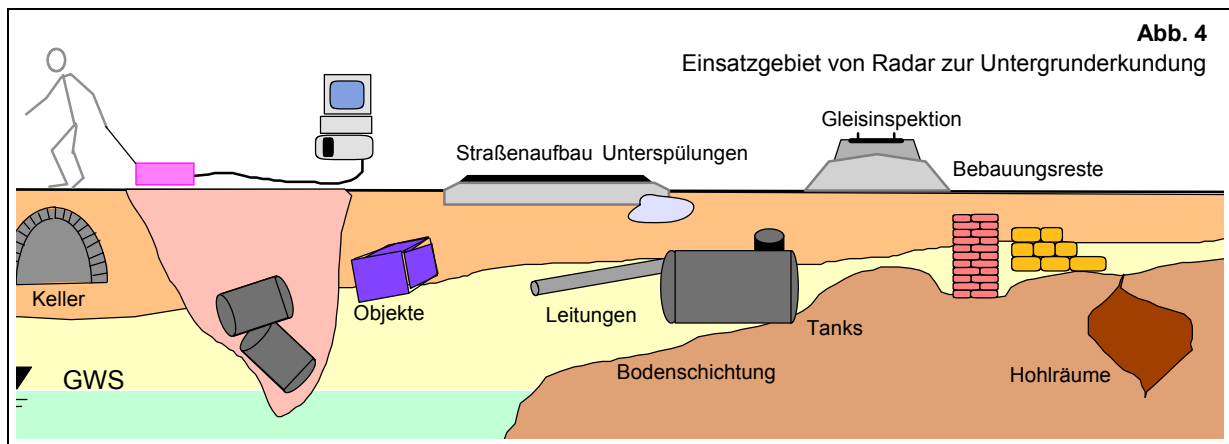
Die Reichweite bzw. Eindringtiefe von Georadar ist i.w. von folgenden Punkten abhängig:

- ◆ **Reflexionskoeffizient:** Damit eine Reflexion entsteht, muß ein Materialkontrast vorhanden sein. Maximal ist dieser bei Metall. Metallgegenstände sind i.a. gut erkennbar, können jedoch Dahinterliegendes verdecken.
- ◆ **Signalabsorption:** Je elektrisch leitfähiger das Medium ist, desto größer ist die Absorption. Bodenleitfähigkeiten können um 10er-Potenzen schwanken. Dies wirkt sich direkt auf die Absorption aus.
- ◆ **Signalstreuung:** Je homogener das Untersuchungsmedium ist, desto sicherer kann ein Objekt erkannt werden und desto weiter reichen die Radarsignale. Künstliche Auffüllungen (Schutt/Müll) streuen in der Regel stark, natürlicher Boden mittel und kompakter Fels wenig.
- ◆ **Entfernung:** Bedingt durch die räumliche Divergenz des Signals nimmt dessen Stärke an der Wellenfront ab.
- ◆ **Objektgröße und -form:** Größere, glatte Flächen reflektieren einen höheren Signalanteil als kleine rauhe Flächen. Stark geneigte Reflektorflächen lenken einen Großteil des Signals zur Seite und nicht zur Antenne.
- ◆ **Signalfrequenzen:** Niederfrequente Signale haben eine größere Reichweite jedoch eine geringere Auflösung.
- ◆ **Meßmethodik/Datenverarbeitung:** Durch spezielle Anordnungen von Sender und Empfänger kann u.U. eine verbesserte Reichweite erzielt werden. Auch eine geeignete digitale Datenverarbeitung kann durch Nutzsignalerhöhung eine Reichweitenverbesserung bewirken.

Praktische Anhaltspunkte für die Reichweite, die teilweise deutlich über- oder unterschritten werden können:

trockene Kiese und Sande 5 - 10 m,	gesättigte Kiese und Sande 2 - 5 m,	schluffige, feuchte Kiese/Sande 2 - 3 m
bindiger, sehr trockener Boden 2 m,	bindiger, feuchter Boden u.U. über 1 m,	Gestein 5 bis über 10 m,
kompakter Dolomit, Marmor über 20 m	Süßwasser 4 bis 6 m,	Salzwasser 0 m.

Feuchte und bindige Bodenbestandteile vermindern aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit die Reichweite.

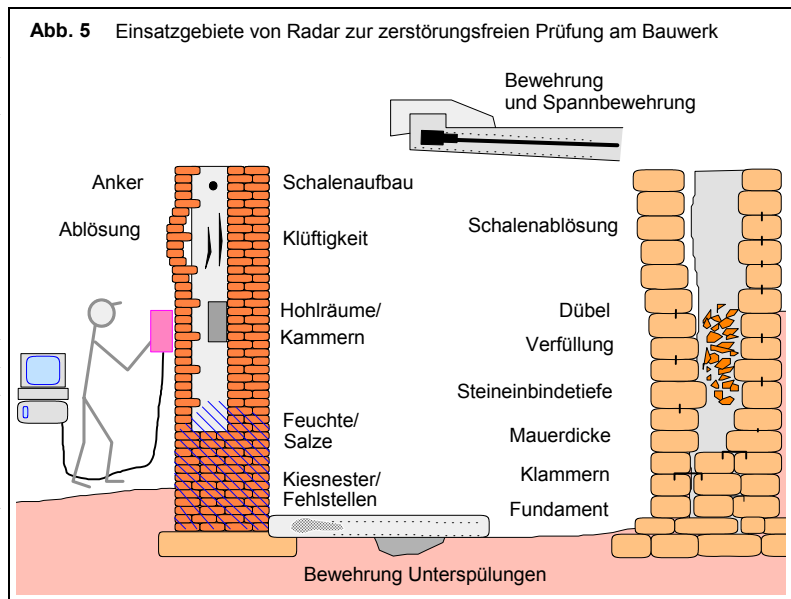


Erwägungen vor dem Georadareinsatz

- ▶ Hebt sich das gesuchte Objekt durch einen ausreichenden Materialkontrast von der Umgebung ab?
- ▶ Ist die Leitfähigkeit des Untersuchungsmediums niedrig genug, daß die erforderliche Reichweite erzielt werden kann?
- ▶ Ist das Untersuchungsmedium homogen oder stark gestört, sodaß das zu suchende Objekt erkennbar sein kann?
- ▶ Ist die Meßoberfläche ausreichend glatt, damit die Antenne dicht darübergezogen werden kann?
- ▶ Können die Meßlinien so gewählt werden, daß vergleichende Messungen möglich sind?
- ▶ Sind die zu erwartenden Aussageunsicherheiten akzeptabel?

Datenverarbeitung

Unverarbeitete Radargramme setzen sich aus dem Primärsignal (Sendesignal plus Oberflächenreflexion, siehe Abb. 3, A), dem Nutzsignal und dem Störsignal zusammen. Die Datenverarbeitung dient der Hervorhebung des Nutzsignals, der Maßstabsentzerrung sowie der Umwandlung der Laufzeit in Tiefenangaben. Bei einfachsten Messungen und klaren Daten kann ggf. auf Datenverarbeitung verzichtet werden. In der Regel ist eine Filterung zur Unterdrückung von stochastischem und kohärentem Rauschen sinnvoll, ohne daß damit der Aufwand zu hoch wird. Wichtig ist auch eine geeignete Darstellung der Radardaten. Verfeinerte Datenverarbeitungsschritte (z.B. Migration, Dekonvolution) erhöhen den Aufwand und sind meist nur bei speziellen Problemstellungen sinnvoll.



Auswertung/Dateninterpretation

Da es sich bei Georadar um ein indirektes Verfahren handelt, müssen die Daten interpretiert werden. D.h., daß die Antwort auf die Fragestellung i.a. nicht unmittelbar aus den Daten abgelesen werden kann. Die Interpretation soll von erfahrenen Bearbeitern erfolgen. Bei klaren Daten kann die Interpretation sehr sicher und zuverlässig sein. Die Dateninterpretation ist normalerweise nicht unbefangenen, da Annahmen und Vorkenntnisse einfließen. Die Auswertung wird durch zielgerichtetes Suchen erleichtert. Bei sehr schlechter Datenlage sind allerdings Fehlinterpretationen oder größere Ungenauigkeiten nicht auszuschließen.

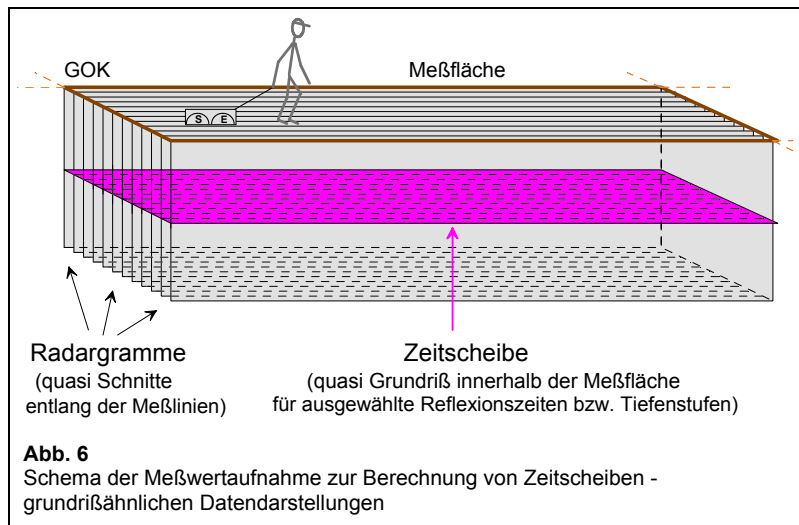
Tiefenangaben/Genauigkeit

Bei Georadar handelt es sich um Laufzeitmessungen. Die Laufzeitachse kann bei bekannter Wellengeschwindigkeit in eine Tiefenachse überführt werden. Da die Wellengeschwindigkeit tatsächlich nie konstant ist, ist die Tiefenachse nur eine Näherung. Insbesondere ist sie sehr unterschiedlich ober- und unterhalb des Grundwasserspiegels.

Ohne besonderen Aufwand und bei normalen Bedingungen liegt die Unsicherheit der Angaben unterhalb von +/-10% der Entfernung. Bei präzisen Messungen und günstigen Bedingungen kann die Unsicherheit wesentlich vermindert werden.

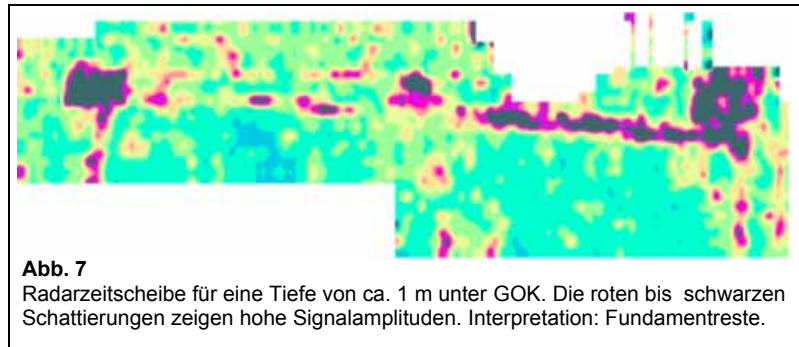
Die Genauigkeit von Tiefenangaben kann durch spezielle Georadarmessungen (z.B. CMP-Methode), Auswertung von Diffraktionen oder durch Kalibrierung an Eichsondierungen verbessert werden. Jedoch haben die Meßbedingungen meist den entscheidenden Anteil an der Ungenauigkeit.

In vielen Fällen reichen Erfahrungswerte der Wellengeschwindigkeit zur groben Tiefenangabe aus.



spezielle Datendarstellung/Zeitscheiben

Bei flächigen Untersuchungen können die Messungen rasterförmig angelegt werden, wie dies in Abb. 6 skizziert ist. Die Meßlinien werden dann mit geringem und möglichst gleichem Abstand ausgelegt. Zunächst werden die bereits beschriebenen Radagramme - quasi Schnitte - aufgezichnet. Die Daten können nun rechnerisch so umsortiert werden, daß man eine Signalamplitudendarstellung innerhalb der gesamten Meßfläche für eine bestimmte Laufzeiten erhält. Diese Darstellung nennt man Zeitscheibe. Dieser Zeitscheibe kann eine etwaige Tiefe zugeordnet werden. Bei Untergrundsuntersuchungen ist sie somit eine grundrißähnliche Darstellung, worin die Reflexionsstärken aus einer bestimmten Tiefe zu sehen sind. Die Berechnungen können für beliebige Tiefen erfolgen.



häufig verwendete Begriffe

- Reflexion* Teil eines Signals, welcher an einer Diskontinuität (Materialwechsel) zurückgeworfen wird (siehe Abb. 3, B)
 - Diffraktion* Teil eines Signals, welcher an (im Vergleich zur Wellenlänge) kleinen Objekten oder an Kanten von ausgedehnten Reflektoren gebeugt und zurückgeworfen wird (siehe Abb. 3, E).
 - Reflektor/Diffraktor* Diskontinuität woran die Reflexion/Diffraktion stattfindet (Oberflächen von z.B. Schichten o. Objekten)
 - Transducer* Sende-Empfänger-Antenne
 - Dominanzfrequenz* Die Signale des Impulsradars besitzen eine Bandbreite von Frequenzen. Bei der Dominanzfreq. handelt es sich um die mittlere Frequenz (Mittenfrequenz). Sie ist ein wichtiges Unterscheidungskriterium v. Antennen.
 - Hochfrequenzantennen* Hochauflösende Antennen mit geringer Eindringtiefe, meist im Einsatz für zerstörungsfreie Prüfungen, Dominanzfrequenz ab ca. 800 MHz, Anhaltspunkt: bis 1 m Reichweite
 - Mittelfrequenzantennen* Mittel auflösende und eindringende Antennen, häufiger Einsatz für geotechnische Fragestellungen, Dominanzfrequenzen zwischen ca. 200 und 600 MHz, Anhaltspunkt: 2 bis 4 m Reichweite
 - Niederfrequenzantennen* Gering auflösende Antennen mit großer Reichweite bei geeignetem Untergrund, Einsatz meist für geologische Fragestellungen, Dominanzfrequenzen ca. 25 bis 100 MHz, Anhaltspunkt: 3 - 10 m Reichweite
 - Luftwelle* I.a. sehr geringer Signalanteil, der sich jedoch ungedämpft in der Luft ausbreitet und auch zu diesbezüglichen Störsignalen führen kann (insbesondere in Gebäuden).
- Synonyme für Georadar* EMR (Elektromagnetische Reflexion), GR (Georadar), GPR (Groundprobing Radar), Impulsradar

kombinierbare Verfahren

tiefeindringende Metalldetektoren, Geoelektrik, Geomagnetik