

Räumliche TDR-Sensor Sensitivitätscharakteristik in verlustbehafteten, stark dispersiven Böden

N. Wagner^{1,2}, K. Kupfer^{1,2} und E. Trinks¹

¹ Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

² Forschergruppe Feuchtemesstechnik (SMG), Universität Karlsruhe (TH)

Kurzfassung

Die Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Feuchteentwicklung in Bauwerken des Hochwasserschutzes oder Untertagedeponien mit orts aufgelöster Time Domain Reflectometry (Spatial-TDR) erfordert die genaue Kenntnis der Ausbreitungscharakteristik elektromagnetischer Wellen entlang der entsprechenden TDR-Sensoren in gesättigten und teilgesättigten verlustbehafteten und stark dispersiven Böden. In der vorliegenden Untersuchung wurden hierzu 3D elektromagnetische finite Elemente Simulationen (High Frequency Structure Simulator – Ansoft HFSS) für ein Flachbandkabelsensor durchgeführt, der in reale und synthetische Böden eingebettet wurde. Die dielektrischen Spektren der untersuchten Materialien wurden hierzu breitbandig im Frequenzbereich 10 MHz – 20 GHz bestimmt.

Abstract

Accurate monitoring of spatial and temporal moisture variation in structures of flood protecting and subsurface disposal with spatial time domain reflectometry (spatial-TDR) requires precise knowledge of the propagation characteristic of electromagnetic waves along the corresponding sensors in saturated and unsaturated lossy and strong dispersive soils. For these reasons the spatial sensor characteristics of a TDR flat band cable sensor surrounded by synthetic and natural soils was simulated with finite element modelling (High Frequency Structure Simulator – Ansoft HFSS). The dielectric relaxation behaviour of the saturated and unsaturated soils was examined in the frequency range 10 MHz – 20 GHz.

Stichworte: TDR-Sensor, Sensitivitätscharakteristik, Dispersion

1. Einführung

Die aktuellen Entwicklungen in Radio – und Mikrowellentechnologie haben zu einer intensiven Nutzung hochfrequenter elektromagnetischer Verfahren (Time Domain Reflectometry – TDR, Ground Penetrating Radar – GPR, Remote Sensing) in den verschiedenen Teilbereichen der Ingenieurwissenschaften (Bauwesen, Geotechnik, Hydrologie und Umwelttechnik), Geowissenschaften (Bodenphysik, Mineralogie, Geophysik, Geologie, Geographie) und der Archäologie geführt. Die elektromagnetischen Verfahren werden hierbei zur Bestimmung bau – bzw. boden-physikalischer Eigenschaften der untersuchten Materialien wie Wassersättigung und Porosität herangezogen (SHEN et al. 1985, FORKMANN UND PETZOLD 1989, KELLENNERS et al. 2005, KUPFER et al. 2005). Speziell ein Monitoring der räumlichen und zeitlichen Feuchteentwicklung in Bauwerken des Hochwasserschutzes oder Untertagedeponien mit orts aufgelöster Time Domain Reflectometry (Spatial-TDR, SCHEUERMANN et al. 2003, SCHLAEGER 2005, KUPFER et al. 2005) erfordert die genaue Kenntnis der Ausbreitungscharakteristik elektromagnetischer Wellen entlang der entsprechenden TDR-Sensoren in gesättigten und teilgesättigten verlustbehafteten und stark dispersiven Böden, wie Bentonit oder Lehm (vgl. WAGNER et al. 2006).

Die Ausbreitung eines elektromagnetischen Signals entlang eines Sensors unterliegt verschiedenartigen Störgrößen. Ein luft- bzw. wassergefüllter Spalt zwischen Sensor und umgebenden gesättigtem bzw. teilgesättigtem Boden zeigt hierbei die drastischsten Auswirkungen auf das gemessene elektromagnetische Signal mit den damit verknüpften Konsequenzen (Wagner et al. 2006). Des Weiteren wird bei der Interpretation der TDR - Wellenform von einer homogenen frequenzunabhängigen Sensitivitätsverteilung entlang des Sensors ausgegangen, was jedoch unter realen Bedingungen eine grobe Näherung darstellt. Das Werkzeug der Wahl zur Erfassung dieser Problematik ist die 3D finite Elemente Simulation. In der vorliegenden Untersuchung werden hierzu die dielektrischen Materialeigenschaften von Böden unter kontrollierten Bedingungen mittels dielektrischer Spektroskopie bestimmt und als Grundlage zur numerischen Feldberechnung benutzt. Die berechneten frequenzabhängigen S-Parameter bzw. Sprungantworten werden unter definierten und identischen Bedingungen für homogene Materialverteilungen ermittelt sowie die räumlichen Sensoreigenschaften des TDR-Sensors für die messtechnisch kompliziert zu vergleichenden Materialien qualitativ bestimmt und in Beziehung gesetzt.

2. Time Domain Reflectometry (TDR)

Das Verfahren der Time Domain Reflectometry (TDR) beruht auf der Messung der Laufzeit t bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit v eines breitbandigen elektro-magnetischen Stufenimpulses mit einer maximalen Bandbreite von 20 kHz bis 20GHz, der sich entlang des Sensors ausbreitet. Typische Kennwerte sind eine Impulsanstiegszeit von ca. 0.15ns bei einem Abtastintervall Δt von ca. 20 ps (Nyquistfrequenz $f_{\max} = 0.5/\Delta t$), wobei die tatsächlich erreichbare Bandbreite wesentlich durch den Typ und die Länge der verwendeten Koaxialkabel, die Sensorlänge und die Koaxialanschlüsse begrenzt wird (vgl. LOGSON 2000). Im Fall der vorliegenden Untersuchung wurde ein Flachbandkabel (FBK) als Sensor eingesetzt. Das FBK besteht aus drei äquidistanten Kupferleitern, die von einem Polyethylenmantel umgeben sind (KUPFER und TRINKS 2005, HÜBNER et al. 2005).

Die Laufzeit bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses ist zum einen bestimmt durch die verwendete Sensorkonfiguration und zum anderen durch die dielektrischen Eigenschaften des den Sensor umgebenden Materials, also der entsprechende frequenzabhängigen relativen, effektiven komplexen Dielektrizitätszahl $\tilde{\epsilon}_{eff}(\omega) = \epsilon'_{eff}(\omega) - j\epsilon''_{eff}(\omega)$. Die zu berücksichtigenden Gesamtverluste des Materials $\epsilon''_{eff} = \epsilon''_d + \sigma_{DC}/(\omega\epsilon_0)$ ergeben sich hierbei aus den dielektrischen Verlusten ϵ''_d und den durch einen Gleichstromleitfähigkeitsanteil σ_{DC} bestimmten ohmschen Verlusten $\sigma_{DC}/(\omega\epsilon_0)$ (TOPP et al. 1980). Bei der Betrachtung der Ausbreitung der Impulse entlang der Sensoren wird von ebenen elektromagnetischer Wellen (TEM-Bereich) ausgegangen (HEIMOVAARA et al. 2004, KUPFER und TRINKS 2005). Die entsprechenden frequenzabhängigen Kenngrößen der Materialien Phasengeschwindigkeit $v_p(\omega)$ und Dämpfung $\beta(\omega)$ ergeben sich für diesem Fall zu:

$$v_p(\omega) = c\sqrt{2} \left(\sqrt{\sqrt{\epsilon'^2_{eff}(\omega) + \epsilon''^2_{eff}(\omega)} + \epsilon'_{eff}(\omega)} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\beta(\omega) = \omega \sqrt{\sqrt{\epsilon'^2_{eff}(\omega) + \epsilon''^2_{eff}(\omega)} - \epsilon'_{eff}(\omega)} \cdot (c\sqrt{2})^{-1}, \quad (2)$$

hierin ist $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit (FORKMANN UND PETZOLD 1989). Speziell im Falle tonhaltiger Böden kann im Frequenzbereich des TDR-Verfahrens bedingt durch die starke Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl eine deutliche Dispersion der Phasengeschwindigkeit v_p auftreten. Bei der Anwendung breitbandiger Impulse wirkt sich dieser Umstand auf die zu messende Gruppengeschwindigkeit (Signalgeschwindigkeit) v_G aus. Die Verknüpfung zwischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit ist durch die Rayleighsche Beziehung gegeben (FORKMANN und PETZOLD 1989, Bild 1):

$$v_G = \frac{d\omega}{dk} = v_p \left[1 - \frac{f}{v_p} \frac{dv_p}{df} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Bei der weiteren Beschreibung der dielektrischen Eigenschaften der untersuchten natürlichen und synthetischen mineralischen Böden wird ein Vier-Phasen-System herangezogen: Luft, Mineralmatrix, Wasser und Tonmineral-Aggregate. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich die dielektrischen Eigenschaften entlang des TDR-Sensors ändern können.

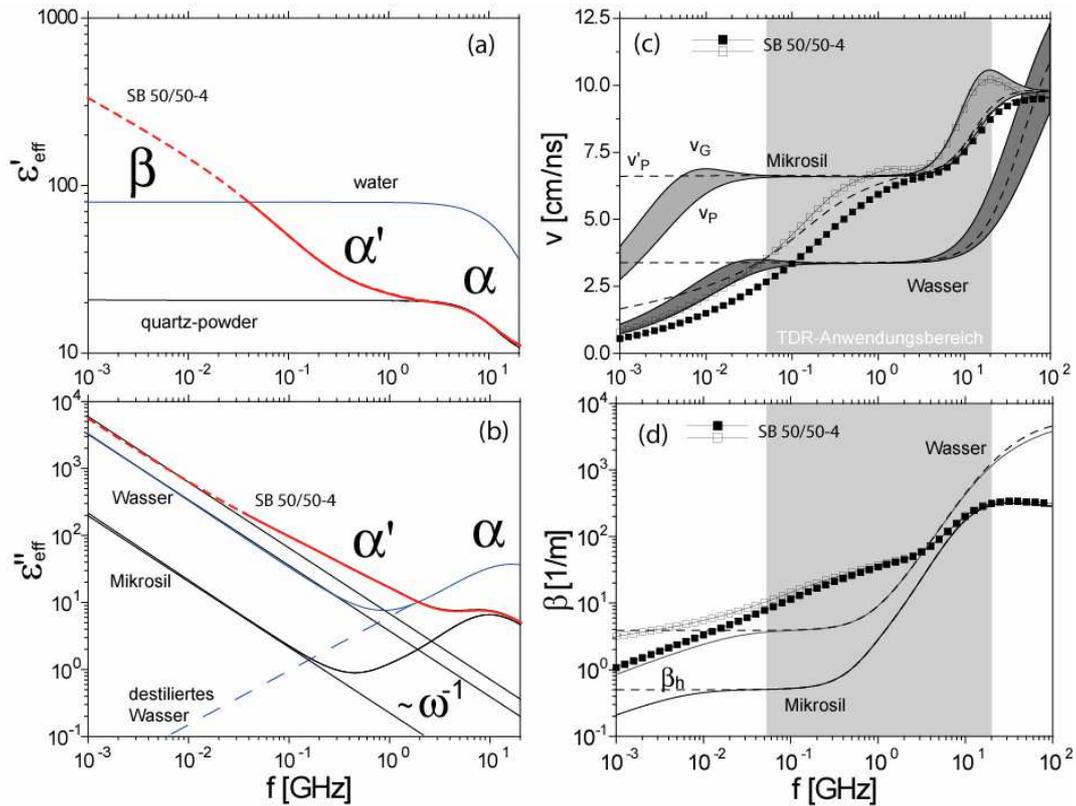


Bild 1: (links) Komplexe relative Dielektrizitätszahl $\tilde{\epsilon}_{eff}$ in Abhängigkeit von der Frequenz mit den entsprechenden Relaxationsprozessen (α, α' und β , vgl. Abschnitt 3) und (rechts) Phasengeschwindigkeit v_p , Hochfrequenzapproximation der Phasengeschwindigkeit v_p' , Gruppengeschwindigkeit v_G , Dämpfung β und Hochfrequenzapproximation der Dämpfung β_h für ein Mikrosil[®]-Quarzpulver Typ 350 (mittlere Korngröße $11 \mu\text{m}$, gravimetrischer Wassergehalt $w = 25,47\%$, Dichte $\rho = 1,55 \text{ g/cm}^3$, Gleichstromleitfähigkeit $\sigma_{DC} = 0.012 \text{ S/m}$), eine 50 Masse % Sand- 50 Masse % Ca-Bentonit Mischung (SB 50/50-4, $w = 28,1\%$, $\rho = 1,75 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_{DC} = 0.34 \text{ S/m}$, Wagner et al. 2006) und natürliches Wasser mit $\sigma_{DC} = 0.18 \text{ S/m}$.

Für den allgemeinen Fall ergibt sich damit eine Abhängigkeit der komplexen Dielektrizitätszahl $\tilde{\epsilon}_{eff}(\omega, \tau, x)$ vom Ort x entlang des Sensorkabels, der Frequenz $\omega = 2\pi f$ sowie vom Beitrag der aktiven Relaxationsprozesse mit der Relaxationszeit $\tau_i(T, p)$ entsprechend der Temperatur-Druckbedingungen (WAGNER et al. 2006).

3. Dielektrische Spektroskopie

Die dielektrischen Spektren der untersuchten Materialien wurden breitbandig im Frequenzbereich $10 \text{ MHz} - 20 \text{ GHz}$ bei RT und 1bar bestimmt (HP8720D sowie R&S ZVR Netzwerkanalysator). Hierbei kam eine Kombination aus offener Koaxialleitung (HP85070B) und verschiedener Koaxialmesszellen zum Einsatz. Ermittelt wurden die S-Parameter S_{ij} der Messzelle mit Probe nach Full-Two-Port Kalibration (Open, Short, 50Ω -Match). Zur Parametrisierung der Spektren im untersuchten Druck-Temperaturbereich wurden drei bodenspezifische Relaxationsprozesse angenommen: (α) die primäre Wasserrelaxation, (α') Relaxation der gebundenen Wasserphase und (β) Maxwell-Wagner

Effekte (ISHIDA et al. 2003). Da das dielektrische Relaxationsverhalten von Böden meist eine deutliche Abweichung von einfachem Debye-Verhalten zeigt (HOEKSTRA et al. 1974, HOLLENDER und TILLARD 1998, KELLENNERS et al. 2005), wurden die einzelnen Prozesse mittels eines fraktionierten Relaxationsmodells vom Jonscher-Typ (Jonscher 1977, HILFER 2001) unter Berücksichtigung einer scheinbaren Gleichstromleitfähigkeit σ_{DC} beschrieben:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{eff}}(\omega) - \epsilon_{\infty} = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta\epsilon_i}{(j\omega\tau_i)^{\alpha_i} + (j\omega\tau_i)^{\beta_i}} - j \frac{\sigma_{DC}}{\omega\epsilon_0} \quad (4)$$

mit der Kreisfrequenz ω , einer Dielektrizitätskonstante für Frequenzen oberhalb ϵ_{∞} , der Relaxationsstärke $\Delta\epsilon_i$ und den Verteilungsparametern $0 \leq \alpha_i, \beta_i$ des i -ten Prozesses. Dispersions- und Absorptionsverhalten werden durch die Verteilungsparameter in Äquivalenz zu den gebräuchlichen Kohlrausch-Williams-Watts, Cole-Cole, Cole-Davidson, Havriliak und Negami Relaxationsmodellen bestimmt (HILFER 2002). Für den Fall $\alpha_i = 0, \beta_i = 1$ erhält man gerade das Debye-Modell. Unter Benutzung eines globalen Optimierungsverfahrens (Shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithmus (SCEM-UA)) nach Heimovaara et al. 2004 wurden die Spektren parametrisiert (vgl. WAGNER et al. 2006).

4. HFSS-Simulation

In der vorliegenden Untersuchung wurden 3D elektromagnetische finite Elemente Simulationen mit einer kommerziellen FE-Software von Ansoft (High Frequency Structure Simulator - HFSS) an einem 30 cm und 6 cm Flachbandkabelsegment durchgeführt, das in Luft, Wasser unterschiedlicher Salinität sowie in reale und synthetische Böden eingebettet wurde.

In Bild 2 ist die Geometrie der simulierten Struktur dargestellt. Es wurden absorbierende Randbedingungen angenommen. Die Anregung des Sensors erfolgt über Koaxialanschlüsse (Wave-Port 1 und 2) an beiden Seiten des FBK.

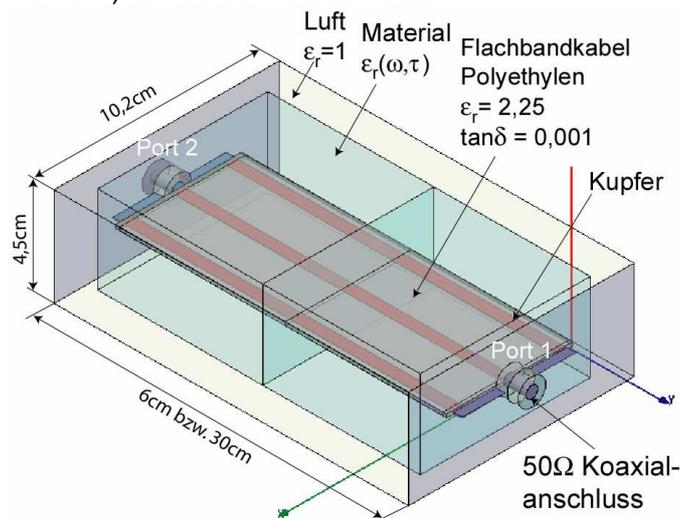


Bild 2: Geometrie der simulierten Struktur.

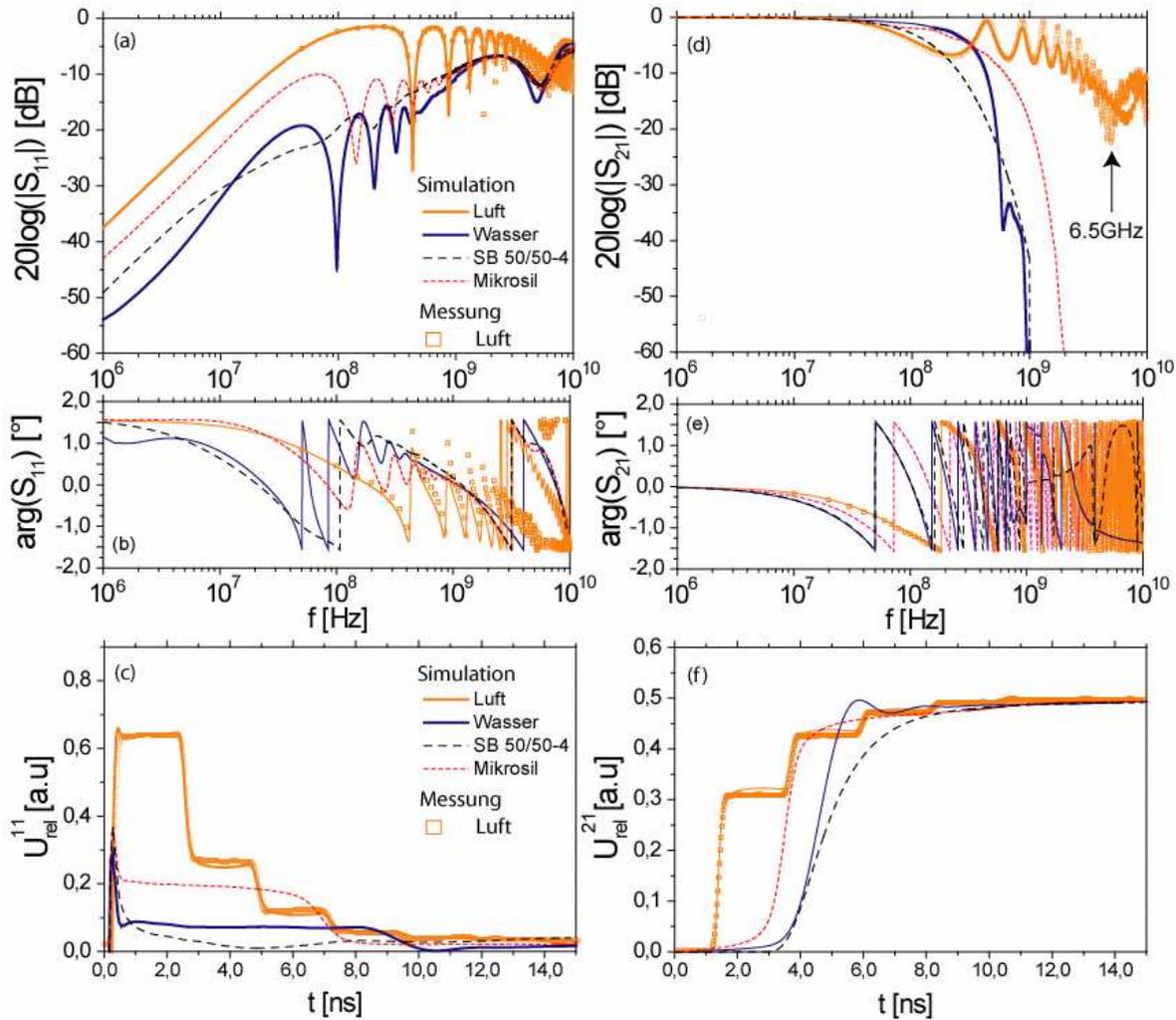


Bild 3: Ergebnisse der Simulation des 30cm FBK eingebettet in Luft im Vergleich zur Messung mit dem Netzwerkanalysator HP8720D (50 MHz – 10 GHz) sowie in die Materialien aus Bild 1: Wasser, Mikrosil Quarzpulver und die Sand-Bentonit Mischung (SB 50/50-4). (a, b) Betrag und Phase des komplexen Reflexionsfaktors S_{11} an Port 1 und (d, e) Transmissionsfaktors S_{21} an Port 2 sowie die entsprechende Sprungantwort (c, f) für einen Abschluss von Port 2 mit 50Ω .

Die auf Vektorelementen basierten FE-Simulationen im Frequenzbereich wurden mit einer adaptiven $\lambda/3$ Netzverfeinerung für Lösungsfrequenzen von 1 MHz, 10 MHz, 0.1GHz, 1 GHz und 12.5 GHz durchgeführt. Die Bestimmung der komplexen S-Parameter S_{ij} erfolgte im Frequenzbereich DC –12.5 GHz mittels eines sogenannten Interpolation-Sweep. Die komplexen simulierten S-Parameter S_{ij} wurden mit einer inversen Fouriertransformation in den Zeitbereich transformiert. Hieraus wurde durch Faltung mit einem synthetischen Eingangssignal für eine Anstiegszeit von 0.2 ns bei einer maximalen Samplingrate von $\Delta t > 40$ ps die Sprungantwort im Transmissions- und Reflexionsmodus beidseitig bestimmt (Bild 3).

Die Messung des Sensor mit Luft als umgebendes Medium kann mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden und liefert die sensorspezifische Charakteristik in Übereinstimmung mit der numerische Berechnung in HFSS sowohl im Frequenzbereich bis ~ 5 GHz als auch im Zeitbereich. Die Ursachen der Abweichungen des Reflexions- und Transmissions-

faktors im Frequenzbereich > 5 GHz sind an Ungenauigkeiten im experimentellen Aufbau geknüpft (Übergänge vom Koaxialanschlusskabel auf das Flachbandkabel), die in der Simulation nicht berücksichtigt werden können. Mit der in dieser Weise optimierten Struktur konnten die Sensoreigenschaften des FBK für messtechnisch kompliziert zu vergleichende Materialien sehr genau ermittelt und in Beziehung gesetzt werden (Bild 3 und 4).

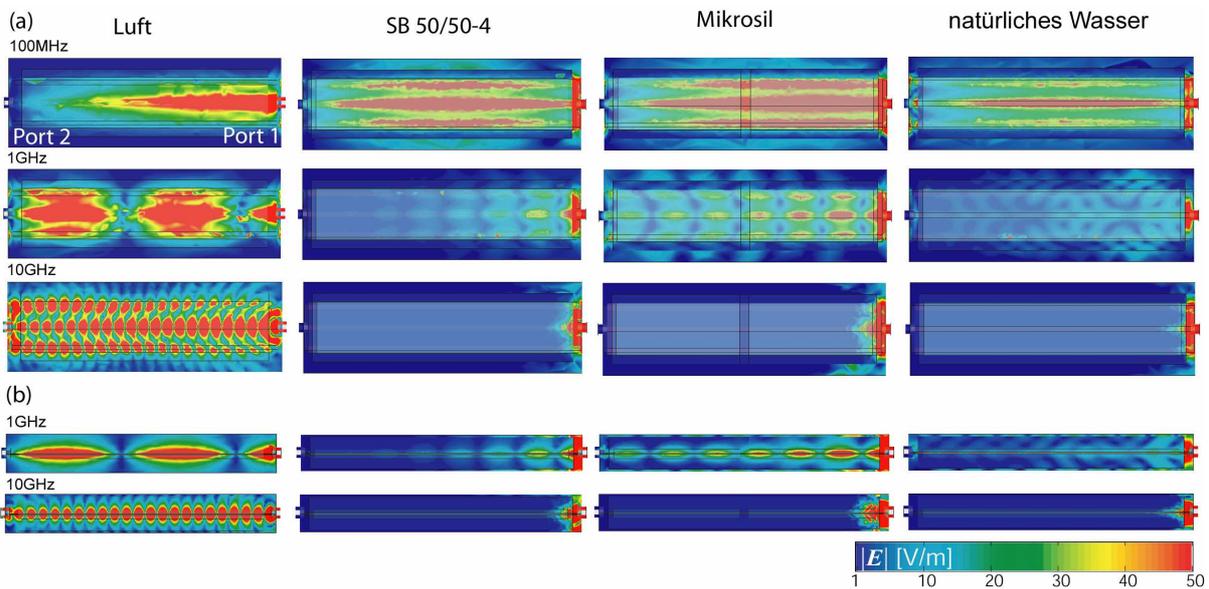


Bild 4: Betrag des elektrischen Feldes (eingeschwungene stehende Welle) für verschiedene Frequenzen nach Anregung von Port 1 (a) für einen horizontalen und (b) für einen vertikalen Schnitt durch die Struktur in Bild 2.

5. Zusammenfassung

Die numerischen Berechnungen geben die 3D elektrischen und magnetischen Feldverteilungen realistisch wieder. Qualitativ ist deutlich eine Änderung der Sensitivitätscharakteristik entlang des Sensors in Abhängigkeit von der Frequenz und vom dielektrischen Relaxationsverhalten des umgebenden Materials erkennbar. Speziell für die hoch verlustbehafteten und stark dispersiven Böden nimmt die Anstiegszeit der Sprungantwort sowie die Signallaufzeit mit steigendem Wassergehalt und steigender Dichte drastisch zu. Im Verlauf der S-Parameter zeigt sich ein sehr stark verschmierter Reflexionsfaktor korrespondierend mit einer deutlichen Abnahme des Transmissionsfaktors schon im Frequenzbereich > 200 MHz. Ferner führt für das 30 cm Segment die starke Dispersion und Absorption zu einem anomalen Verhalten (Umkehreffekt) ab einem kritischen Wassergehalt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung verdeutlichen die Problematik der genauen Kenntnis der räumlichen Sensitivitätscharakteristik von Feuchtesensoren als Basis einer quantitativen Feuchtebestimmung und die hiermit eng verknüpften Anforderungen an die Inversionsmethodik. Weiterführende numerische, experimentelle und theoretische Untersuchungen in Kombination mit Rekonstruktionsverfahren müssen die Möglichkeiten und Grenzen von Spatial-TDR in stark verlustbehafteten und dispersiven Materialien zeigen.

Literatur

- FORKMANN, B. UND PETZOLD, H. (1989); *Prinzip und Anwendung des Gesteinsradars zur Erkundung des Nahbereiches*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig
- HEIMOVAARA, T. J., HUISMAN, J. A., VRUGT, J. A., BOUTEN, W. (2004), *Obtaining the Spatial Distribution of Water Content along a TDR Probe Using the SCEM-UA Bayesian Inverse Modeling Scheme*, *Vadose Zone J.*, 3, 1128-1145
- HILFER, R. (2002), *H-function representations for stretched exponential relaxation and non-Debye susceptibilities in glassy systems*, *Phys. Rev. E*, 65, 061510
- HOEKSTRA, P., DELANEY, A. (1974), *Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies*, *Journal of Geophysical Research*, 79, 11, 1699-1708
- HOLLENDER, F., TILLARD, S. (1998), *Modelling ground-penetrating radar wave propagation and reflection with the Jonscher parameterization*, *geophysics* 63, 6, 1933-1942
- HÜBNER, C., SCHLAEGER, S., BECKER, R., SCHEUERMANN, A., BRANDELIK, A., SCHÄDEL, W., SCHUHMANN, R. (2005), *Advanced Measurement Methods in Time Domain Reflectometry* in K. Kupfer (Ed.), *Electromagnetic Aquametry*. Springer, 317-347
- ISHIDA, T.; KAWASE, M.; YAGI K.; YAMAKAWA, J.; FUKADA K. (2003), *Effects of the counterion on dielectric spectroscopy of a montmorillonite suspension over the frequency range 10^5 - 10^{10} Hz*, *Colloid and Interface Science*, 268, 121-126
- JONSCHER, A. K. (1977), *Universal Dielectric response*, *Nature*, 267, 673-679
- KELLEINERS, T.J., ROBINSON, D.A., SHOUSE, P.J., AYARS, J.E., SKAGGS, T.H. (2005), *Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils*, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 69, 67-76
- KUPFER, K., TRINKS, (2005), *Simulations and experiments for detection of moisture profiles with TDR in a saline environment*, IN K. KUPFER (Ed.), *Electromagnetic Aquametry*, (2005) Springer-Verlag, 349-365
- ROBINSON, D. A., JONES, S. B., WRAITH, J. M., OR, D., FRIEDMAN, S. P. (2003), *A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry*, *Vadose Zone J* 2 444-475
- SCHEUERMANN, A. BRAUNS, J. SCHLAEGER, S. BECKER, R. AND HÜBNER, CH. (2003), *Monitoring von Deichen und Dämmen mittels TDR*, Ernst & Sohn, Special, 1/03, Hochwasserschutz, S. 24-28
- SHEN, L. C., SAVRE, W. C., PRICE, J. M., ATHAVALE, K. (1985), *Dielectric Properties of Reservoir Rocks and Ultra High Frequencies*, *geophysics*, 50, 4, 692-704
- SIHVOLA, A. (2000), *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*, IEEE Electromagnetic Waves Series, 47, INSPEC Inc.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. (1980), *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.*, *Water Resour. Res.*, 16 (1), 574-588
- WAGNER, N. KUPFER, K., TRINKS, E. (2006), *Determination of the spatial TDR-sensor characteristics in strong dispersive subsoil using 3D-FEM frequency domain simulations in combination with microwave dielectric spectroscopy*. *Measurement Science and Technology*, in print

Kontaktadresse:

Dr. Norman Wagner

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Amalienstraße 13

D-99423 Weimar

Tel.: +49-3643-564-364; Fax: +49-3643-564-204

Email: norman.wagner@mfpa.de