

Ortsaufgelöste Zeitbereichsreflektometrie zur Beobachtung des Wasserhaushalts im Boden (Lysimeter Testumgebung Thüringen/Deutschland)

Frank Bonitz^{1*}, N. Wagner¹, K. Kupfer¹, Steffi Knoblauch² und J. Karlovsek³

Zusammenfassung

Konventionelle Methoden zur Bestimmung der Bodenfeuchte basieren oftmals auf Messungen mit Neutronen-sonden. Diese werden teilweise durch elektromagnetische Sensoren ersetzt, welche meist in Verbindung mit Rohrträgersystemen Verwendung finden [1].

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts in verschiedenen Bodenschichten während des Pflanzenwachstums. Je nach Pflanzenart ergeben sich Wurzeltiefen bis zu zwei Meter Tiefe [2]. Aus diesem Grund wird eine Entwicklung entsprechend langer Sensoren angestrebt. Es wird ein Zweitor Zeitbereichsreflektometer [3] in Kombination mit Mikrowellenübertragungsleitungen vorgestellt, welches für diese Anwendung entwickelt wurde. Die verwendeten Sensoren und das Messverfahren werden beschrieben. Im Anschluss daran werden die Datenverarbeitungsschritte erläutert. Im Folgenden wird die Sensorkonfiguration im Testfeld der Lysimeterstation gezeigt. Auf Grundlage dessen werden die erzielten Messergebnisse dargestellt und mit den Werten von Ringoszillator- [4] und Neutronen-sondenmessungen verglichen.

Schlagwörter: volumetrischer Wassergehalt, Bodenfeuchte, Permittivität

Summary

Conventional, water content measurements in agricultural applications are based on neutron moisture meter (NMM) methods which recently were replaced by electromagnetic based sensor techniques used from within access tubes [1].

In this context, the objective of the presented study is the determination of water content profiles in the top and subsoil for monitoring of the hydrological water balance during plant growth. According to crop types there are different rooting depth, e.g. winter wheat with up to two meters [2]. For this reason moisture profiles need to be monitored at least to that depth. A new full two port time domain reflectometry (TDR) technique [3] in combination with microwave transmission line sensors were developed for advanced data acquisition and analysis. The applied sensors and the measurement principle will be depicted followed by a description of the applied processing steps. After that the sensor configuration of the test site at a lysimeter and the layered arrangement of the soil will be shown. Based on this the measurement results of the proposed method will be compared to ring oscillator [4] and neutron probe based measurements.

Keywords: spatial Time Domain Reflectometry (sTDR), volumetric water content, soil moisture, permittivity

Einleitung

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung der Bodenfeuchte während des Pflanzenwachstums auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche. Da sich je nach Pflanzenart unterschiedliche Wurzeltiefen ergeben, sind Messungen bis zu zwei Meter Tiefe notwendig [2]. Zur Feuchtebestimmung werden unter anderem elektromagnetische Verfahren verwendet. Hierzu zählen kapazitive und resistive Methoden sowie Verfahren im Zeit- und Frequenzbereich. Zur Bestimmung von Tiefenprofilen werden entweder viele Sonden punktuell eingesetzt oder zylindrisch optimierte Sondensegmente zur Einbringung über Bohrlöcher genutzt. Je nach Tiefe gestalten sich die Ein- und Ausbringung unterschiedlich schwierig. Dies wirkt sich auch auf den mechanischen Verschleiß aus. Die Einbringung von Mikrowellenleitungen stellt einen bekannten Ansatz dar.

In dieser Untersuchung werden Drei-Leiter-Strukturen bis zu einer Länge von zwei Metern in Kombination mit einem breitbandigen Zeitbereichsreflektometer (UWB M-Sequenz Sensor) eingesetzt. Entlang der Sonden wird über ein Rekonstruktionsverfahren [5] die Feuchte bestimmt. Es wird das Vorgehen zur Bestimmung, die praktische Umsetzung im Feld sowie der Vergleich mit Referenzmesssystemen dargestellt. Das eingesetzte System kann an beiden Enden der Sonde sowohl das Reflexions- als auch das Transmissions-signal messen. Der Aufbau erfolgte auf einem Standort der Lysimeterstation Buttelsstedt/Thüringen/Deutschland.

Messverfahren und Methoden

Entsprechend *Abbildung 1* besteht das Gesamtsystem aus einer Steuer- und Verarbeitungseinheit (z.B. in Form eines

¹ Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 4, D-99423 WEIMAR

² Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Naumburgerstraße 98, D-07743 JENA

³ The Golder Geomechanics Centre, University of Queensland, Brisbane, Australia

* Ansprechpartner: DI Frank Bonitz, frank.bonitz@mfpa.de



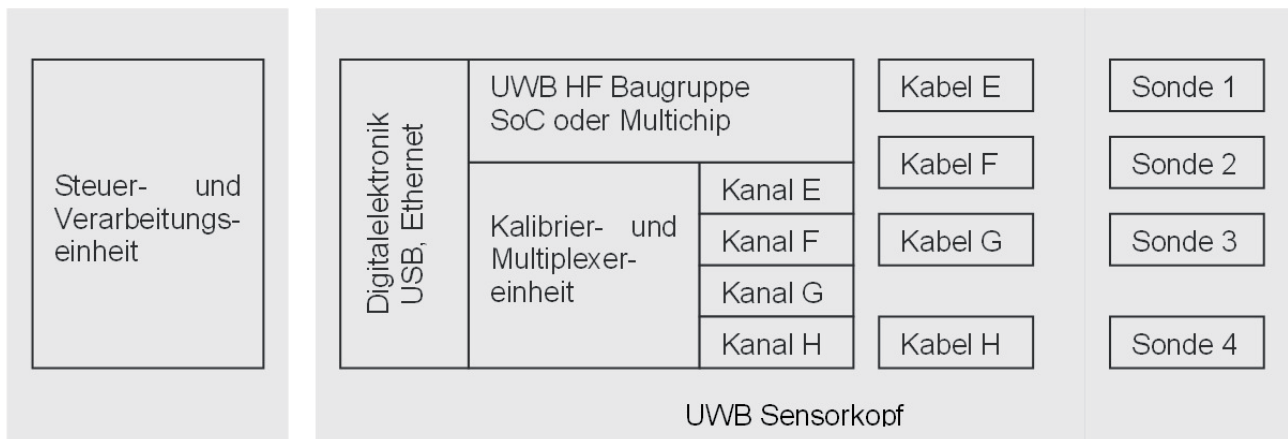


Abbildung 1: Module des Versuchsmusters zur Bestimmung von ortsaufgelösten Feuchteprofilen

Standard PC) und einem UWB Sensorkopf. Der Sensorkopf wiederum beinhaltet im Kern eine Hochfrequenz(HF)-Baugruppe zur Erzeugung eines Mikrowellenimpulses mit der Bandbreite von 2 MHz bis 4 GHz, eine Kalibrier- und Multiplexereinheit sowie vier Messkanäle an welche Sonden bis zu zwei Meter Länge angeschlossen werden können. Die Verwendung längerer Sonden ist prinzipiell möglich, erscheint aufgrund einer höheren Signaldämpfung und somit einer Abnahme der effektiv nutzbaren Bandbreite bei zunehmender Leitungslänge als wenig sinnvoll. Mittels der Kalibriereinheit wird es möglich, die Sensitivität des Gesamtsystems zu erhöhen und eine reproduzierbare Transformation der Signale in Impulsantworten, Sprungantworten oder Frequenzspektren vorzunehmen. Der UWB Sensor besitzt einen Dynamikbereich von -55 dB und eine Sensitivität von -80 dB, d.h. es können Änderungen im Messsignal bis zur vierten Nachkommastelle aufgelöst werden, was wiederum sehr geringen Änderungen der Permittivität (und Materialfeuchte) entspricht. Als Sonden können je nach Anwendungsgebiet und Feuchtebereich unterschiedliche Geometrien verwendet werden. Am Standort werden sowohl zylindrische Sonden als auch Flachbandkabel eingesetzt. Durch die beidseitigen Reflexions- und Transmissionsmessungen wird es möglich, Sensorlängen bis zu zwei Meter zu verwenden.

In *Abbildung 2* sind die Verarbeitungsschritte zum Erhalt eines Feuchteprofils aus den Messdaten dargestellt. Nach dem Aussenden des HF- Signals werden zunächst Kalibriermessungen an internen Standards durchgeführt. Im Anschluss daran wird das Reflexions- und Transmissionsignal von beiden Seiten der Sonde aus gemessen. Nach der Kalibrierung des Messsignals anhand der internen Standards erfolgt die Vorverarbeitung der Daten. Hierzu wird eine Filterung im Frequenzbereich auf die effektiv nutzbare Bandbreite vorgenommen. Des Weiteren wird die Laufzeit über der Sonde anhand der Reflexions- und Transmissionsmessung bestimmt. Schließlich erfolgt eine Transformation der Daten in die für die Rekonstruktion benötigte Sprungantwort. Danach erfolgt die Erstellung des Eingangsdatensatzes für die Rekonstruktion aus der Sprungantwort, den Parametern der verwendeten Sonde sowie dem Referenzsignal, welches am Eingang der Sonde anliegt. Der Rekonstruktionsalgorithmus bestimmt über eine numerische Optimierung die Permittivi-

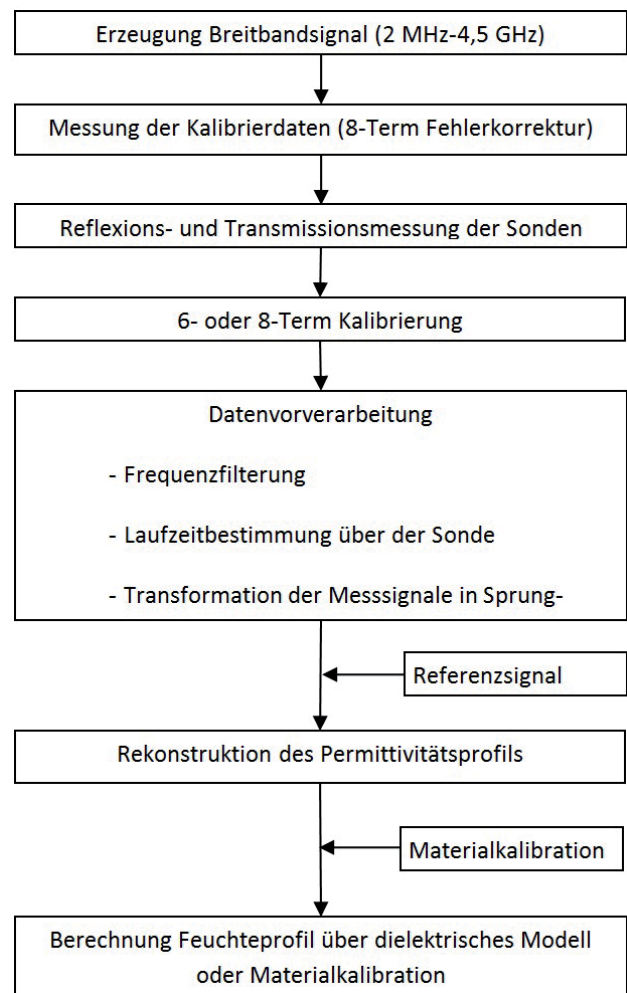


Abbildung 2: Prozessablauf bei der Berechnung von Feuchteprofilen

tätsverteilung entlang der Sonde. Nun kann entweder über ein geeignetes dielektrisches Modell aus der Permittivität die Feuchte berechnet werden oder die Feuchte wird direkt über eine Materialkalibration bestimmt [6].

Die Anordnung der Sensoren im Testfeld ist *Abbildung 3a* zu entnehmen. Die Zylindersonden (CP) wurden durch Ein-

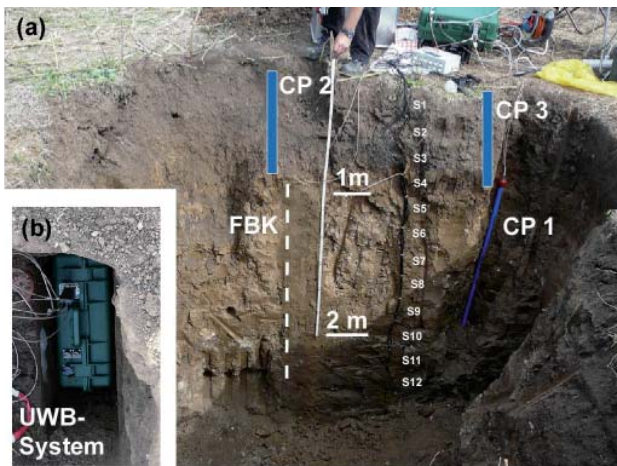


Abbildung 3: Bodenprofil (Braunerde-Tschernosem, Löß) während der Einbringung der Sensoren; Bodenschichtung: Ap/Ah, Ah-Bv, Ckc1, Ckc2 (zwei unterschiedliche Lösslagen)

rammen eingebracht. Zur Einbringung des Flachbandkabels (FBK) und der punktuellen Sonden inklusive Temperatursensoren (S) wurde eine ca. drei Meter Tiefe Grube ausgehoben. Für Referenzmessungen wurden im Umkreis von drei Metern Neutronensondenrohre gesetzt. Aus der Abbildung wird auch sehr gut die Schichtung des Bodens deutlich. Das Bodenprofil gliedert sich in vier Horizonte und weist zwei Bodenarten (Tu3, Lt3) auf. Das UWB-Messsystem (Abbildung 3b) wurde so nah wie möglich an den Sonden platziert, um möglichst kurze koaxiale Zuleitungen nutzen zu können und eine geringe Dämpfung des ausgesendeten Signals zu garantieren.

Ergebnisse

Für die Bodenschichten des Standortes wurden während des Einbaus ungestörte Proben entnommen [7], für die 16 Feuchtstufen eingestellt wurden. *Abbildung 4* zeigt die Kalibrierkurve der Permittivität bei einem Gigahertz und den volumetrischen Wassergehalt sowie die empirische Abhängigkeit nach TOPP et al. [8]. Am besten wird das Verhältnis von volumetrischem Wassergehalt und Permittivität bei einem Gigahertz für die Bodenschicht zwischen 70 und 170 cm abgebildet (RMSE 0,66). Für die oberste Bodenschicht ergibt sich der maximale RMSE zu 2,5.

Die Messsysteme wurden im Herbst 2011 am Teststandort installiert. Im Zeitraum von Januar 2012 bis Mai 2012 wurden mit dem UWB- und Spade-Messsystem im vier Stunden Takt Messungen durchgeführt. Die Klimadaten wurden einmal täglich erhoben. Referenzmessungen mit der Neutronensonde wurden ca. alle 10 Tage durchgeführt. In *Abbildung 5* sind die Feuchteverteilungen (volumetrischer Wassergehalt) der oberen Bodenschicht bis 50 cm Tiefe für die verschiedenen Sensorsysteme sowie die Temperatur- und Niederschlagswerte dargestellt.

Diskussion

Die Gleichung nach TOPP stellt eine einfache und praktikable Möglichkeit dar, um gemessene Permittivitätswerte

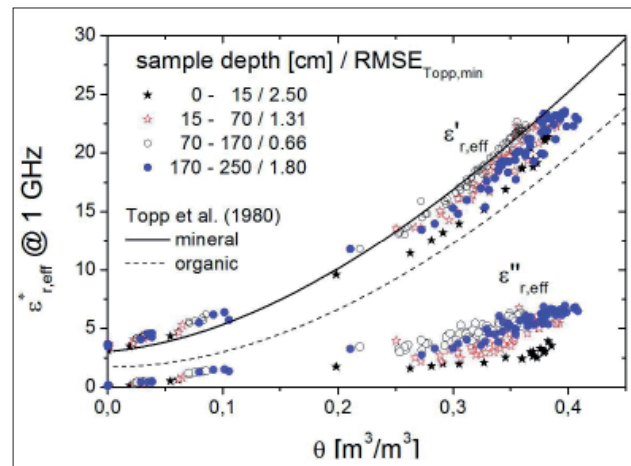


Abbildung 4: Materialkalibration Permittivität vs. volumetrischer Wassergehalt

in Wassergehalte umzurechnen. Sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit größer, muss entweder der Weg über die Materialkalibration gegangen werden oder es werden erweiterte Modelle genutzt, welche wiederum zusätzliche Eingangsparameter verlangen, die ebenfalls durch in situ Messungen unterlegt werden müssen.

In Abgleich mit den meteorologischen Daten (*Abbildung 5*, Temperatur und Niederschlag) ergibt sich für alle Messsysteme ein ähnlicher Verlauf der Bodenfeuchte. Je nach Position des Sensors ergeben sich in tieferen Schichten unterschiedliche Feuchteverläufe. Werden die Neutronensondenmessungen als Referenzwert eingesetzt, ergibt sich beim Vergleich der absoluten Feuchtwerte bei der Zylindersonde eine Unterschätzung des Wassergehalts. Als Ursachen hierfür kommen folgende Punkte in Frage: (i) die Datenvorverarbeitung, speziell Abweichungen des Referenzsignals, (ii) die Annahmen für die Parameter der Mikrowellenleitung, (iii) die Frequenzabhängigkeit der Permittivität und (iv) eine mangelnde Ankopplung der Sonde an das umgebende Medium (Lufteinschlüsse).

Eine weitere Möglichkeit der Verbesserung stellt eine Verlagerung der Kalibrierereinheit aus dem UWB-System an die Enden der Sonde dar. Die Dimensionen der Kalibrierereinheit sind nach derzeitigem Stand der Technik zu groß, um dies zu realisieren.

Schlussfolgerungen

Das vorgestellte UWB Messsystem bietet eine flexible Anordnung zur Bestimmung der Bodenfeuchte. Das System ist sensitiv gegenüber geringen Feuchteänderungen. Alle Messsysteme sind geeignet, den qualitativen Feuchteverlauf abzubilden. In einem nächsten Schritt sollen kapazitive Sonden in den Vergleich mit aufgenommen werden. Des Weiteren ist geplant das Auswerteverfahren um die Frequenzabhängigkeit zu erweitern.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Thüringer Aufbaubank (TAB) für die Förderung des Projektes 2008FE9023.

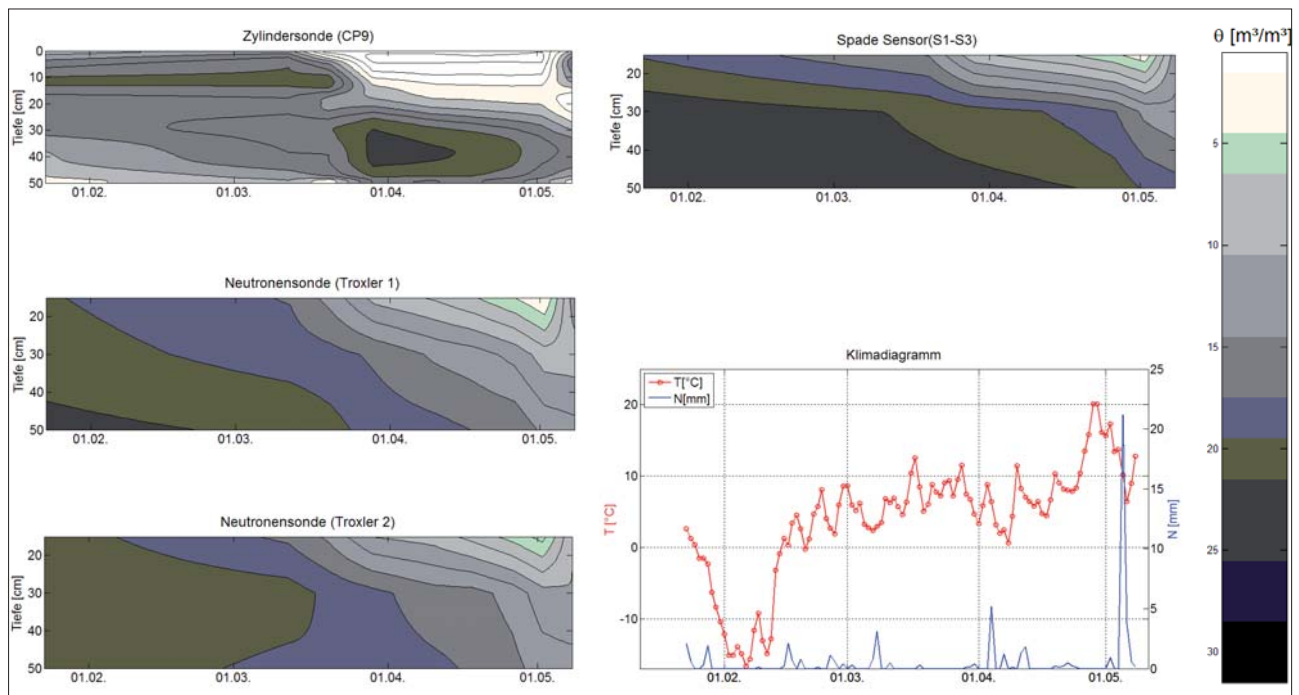


Abbildung 5: Messungen im Zeitraum Januar bis Mai 2012: Tiefenprofile der Feuchte und Klimadaten

Literatur

- [1] EVETT, S.R., R.C. SCHWARTZ, J.A.TOLK and T.A. HOWELL, 2009: Soil profile water content determination: spatiotemporal variability of electromagnetic and neutron probe sensors in access tubes. *Vadose Zone Journal*, 8, 926-941.
- [2] KNOBLAUCH, S., 2009: Determination of threshold value of soil water content for field and vegetable plants with lysimeter measurements. In: *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 11, EGU 2009 - 13389-2, 2009 EGU General Assembly.
- [3] SACHS, J., 2004: M-sequence radar. In *Ground Penetrating Radar*, 2nd edition, D.J. Daniels ed., IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, pp. 225-237.
- [4] SCHLAEGER, S., C. HUEBNER and R. BECKER, 2005: Simple Soil Moisture Probe for Low-Cost Measurement, ISEMA 2005. Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, pp. 258-265.
- [5] SCHLAEGER, S., 2005: A fast TDR-inversion technique for the reconstruction of spatial soil moisture content, *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 481-492.
- [6] WAGNER, N., K. EMMERICH, F. BONITZ and K. KUPFER, 2011: Experimental Investigations on the Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Material Properties of Soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(7), pp. 2518-2530, 2011, doi:10.1109/TGRS.2011.2108303.
- [7] LAUER, K., N. WAGNER and P. FELIX-HENNINGSEN, 2012: A new technique for measuring broadband dielectric spectra of undisturbed soil samples. *European Journal of Soil Science*, 63, 224-238.
- [8] TOPP, G.C., J.L. DAVIS and A. ANNAN, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, no. 3, pp. 574-582.