

Abbaubare Sensorknoten zur Überwachung der Bodenfeuchte im Smart Farming

Sebastian Böller¹, Benedikt Loepp¹, Thorben Greuter¹ und Anton Grabmaier²

¹Fraunhofer IMS, 47057 Duisburg, Germany

²Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Elektronische Bauelemente und Schaltungen

Zusammenfassung

Die präzise Bestimmung der Bodenfeuchte ist eine zentrale Voraussetzung für eine zielgerichtete Bewässerung in der modernen Landwirtschaft. Kabellose Sensorknoten ermöglichen dabei eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung, verbleiben jedoch bei großflächigem Einsatz potenziell als Elektronikschrott im Feld. In diesem Beitrag wird ein abbaubarer Sensortransponder zur Bestimmung der Bodenfeuchte vorgestellt, der sich nach seiner Einsatzzeit umweltverträglich zersetzt und daher nicht wieder eingesammelt werden muss.

Das Konzept basiert auf einem passiven UHF-RFID-Sensortransponder, der ohne Batterie auskommt und somit einen besonders einfachen Aufbau aufweist. Als zentrale Komponente wurde eine abbaubare Leiterplatte aus Holz als Trägerschicht und Eisen als Leitermaterial entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass Leitungsbreiten bis 600 μm zuverlässig gefertigt werden können. Der kapazitive Bodenfeuchtesensor sowie die Antenne wurden simulationsbasiert ausgelegt und auf konventionellen Materialien aufgebaut und charakterisiert. Erste Messungen über einen Zeitraum von etwa fünf Tagen zeigen, dass der Transponder den Trocknungsvorgang im Boden qualitativ erfassen kann. Der genutzte Dynamikbereich von 4 pF bis 8 pF lässt Potenzial zur Optimierung des Sensordesigns erkennen. In weiteren Schritten soll die Beziehung zwischen Sensorkapazität und volumetrischem Wassergehalt mithilfe von Referenzsensoren ermittelt sowie der Transponder vollständig auf abbaubaren Materialien realisiert werden.

Keywords: Bodenfeuchte, abbaubare Elektronik, UHF-RFID, kapazitiver Sensor, Smart Farming

I Einleitung

Die moderne Landwirtschaft steht vor komplexen Herausforderungen. Durch den Klimawandel ändern sich die Bedingungen in diesem Wirtschaftszweig deutlich. Hitzewellen, Dürreperioden und Trockenzeiten können eine künstliche Bewässerung erforderlich machen, gleichzeitig ist das Wasser hierfür limitiert. Daher sollte nur zeitlich und räumlich zielgerichtet bewässert werden, wofür jedoch eine zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Bestimmung der Bodenfeuchte erforderlich ist.

Zur Bestimmung der Bodenfeuchte kann zwischen drei Ansätzen unterschieden werden: 1) Es können Bodenproben entnommen und im Labor untersucht werden. Die Qualität der Messwerte ist hier am höchsten, der Arbeitsaufwand macht eine hohe Auflösung aber unpraktikabel. 2) Aufnahmen mit Satelliten oder Flugzeugen ermöglichen die Untersuchung einer großen Fläche. Die Bodenfeuchte ist hier aber nicht direkt als Messgröße zugänglich. Stattdessen muss auf andere Messgrößen zurückgegriffen werden, um die Bodenfeuchte zu schätzen. Darüber hinaus ist die Häufigkeit der Aufnahmen begrenzt. 3) Kabellose Sensorknoten ermöglichen eine Untersuchung mit hoher

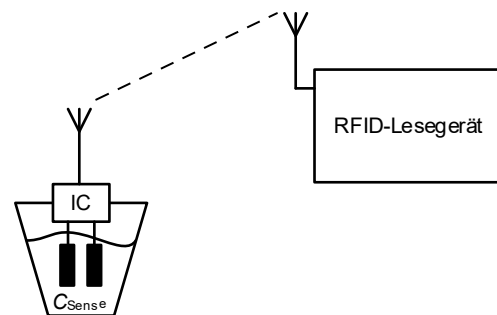


Abb. 1: Sensortransponder zur Bestimmung der Bodenfeuchte mit kapazitivem Sensor.

zeitlicher Auflösung. Für eine hohe räumliche Auflösung ist jedoch eine große Anzahl von Sensorknoten erforderlich.

Um unter Verwendung von Sensorknoten die räumliche Auflösung zu verbessern und die untersuchte Fläche zu vergrößern, muss dementsprechend die Zahl der Sensorknoten stark vergrößert werden. Damit alte Sensorknoten nicht als Elektronikschrott im Acker verbleiben, ist es dann jedoch erforderlich, ihre Position beim Ausbringen aufzuzeichnen und die Sensor-

knoten am Ende ihrer Lebenszeit wieder einzusammeln.

Sethi et al. haben eine neue Klasse von Sensorknoten vorgeschlagen, die vollständig aus biologisch abbaubaren Materialien bestehen [1]. Nach dem Ausbringen sollen sie zur Erfassung von Messwerten genutzt werden, die kabellos übertragen werden. Am Ende der Lebensdauer sollen sich diese Sensorknoten umweltverträglich zersetzen, sodass sie nicht wieder eingesammelt werden müssen und keine Schadstoffe in der Umwelt verbleiben. Sensorknoten mit dieser Eigenschaft bezeichnen wir im Folgenden als abbaubare Sensorknoten.

Alsultan et al. haben einen Sensortransponder vorgestellt, der ohne Batterie auskommt [4]. Dieser misst die Bodenfeuchte kapazitiv und stellt die Messwerte kabellos zur Verfügung. Allerdings ist der Sensortransponder nicht abbaubar und muss daher am Ende seiner Lebensdauer eingesammelt werden.

In diesem Beitrag verfolgen wir einen ähnlichen Ansatz und stellen einen batterielosen Sensortransponder vor, jedoch mit dem Ziel, diesen aus abbaubaren Materialien aufzubauen. In Abschnitt II beschreiben wir zunächst die Anforderungen an einen solchen abbaubaren Sensorknoten und stellen unser Konzept vor. In Abschnitt III beschreiben wir die Entwicklung einer abbaubaren Leiterplatte als zentrale Komponente eines abbaubaren Sensorknotens. In Abschnitt IV stellen wir das Design eines Sensortransponders zur Bestimmung der Bodenfeuchte vor, der zunächst auf konventionellen Materialien aufgebaut wurde. In Abschnitt V stellen wir erste Messergebnisse des Sensortransponders vor. Schließlich diskutieren wir die Ergebnisse in Abschnitt VI und ziehen ein Fazit.

II Abbaubare Sensorknoten: Anforderungen und Konzept

Abbaubarkeit kann unterschiedlich definiert werden und sowohl chemische, physikalische als auch biologische Mechanismen einschließen. Entscheidend für die Abbaubarkeit von Sensorknoten für die Landwirtschaft ist, dass sich diese nach einer bestimmten Einsatzzeit ausschließlich in Stoffe zersetzen, die für die Landwirtschaft im Speziellen und die Umwelt im Allgemeinen unbedenklich sind. Dabei sollte das Verhalten der Sensorknoten während der Einsatzzeit weitgehend unverändert bleiben, bevor sich diese nach der Einsatzzeit innerhalb einer überschaubaren Zeitspanne zersetzen. Vor allem die Messgenauigkeit sollte über die gesamte Einsatzzeit hinreichend hoch bleiben. Um einen Sensorknoten in einer abbaubaren Ausführung zu realisieren, müssen dementsprechend alle Komponenten, aus denen er besteht, auf Abbaubarkeit geprüft werden und ggf.

abbaubare Ausführungen der Komponenten entwickelt werden. Je mehr unterschiedliche Komponenten für einen Sensorknoten erforderlich sind, desto aufwändiger wird dieses Vorgehen. Für einen klassischen Sensorknoten umfasst es die Leiterplatte, die Batterie, den Sensor, die elektronischen Bauelemente, die Antenne und das Gehäuse. Der damit verbundene Aufwand, einen abbaubaren Sensorknoten zu entwickeln, ist entsprechend groß. Dieser Ansatz wurde in [2] verfolgt, wobei nur ein Teil der Komponenten in einer abbaubaren Ausführung realisiert wurde.

Sensortransponder basierend auf passiven Transpondern, wie sie für *Electronic Product Code Generation 2* (EPC Gen2) *Ultra High Frequency Radio-Frequency Identification* (UHF-RFID) [3] verwendet werden, zeichnen sich durch ihren simplen Aufbau aus. Als passive Transponder können sie ohne Batterie betrieben werden und bestehen üblicherweise nur aus einem *Integrated Circuit* (IC) und einer Antenne. Aus diesem Grund verfolgen wir zur Realisierung abbaubarer Sensoren den Ansatz eines solchen passiven Sensortransponders entsprechend Abb. 1.

Ein RFID-Transponder-IC wie das *EM4152* von EM Microelectronics [5] erlaubt das Auslesen einer Kapazität als Sensor. Diese Funktion dient der Messwerterfassung. Über die Antenne wird der Transponder vom Lesegerät kabellos mit Leistung versorgt, während die modulierte Rückstreuung die Übertragung der Messwerte zum Lesegerät erlaubt. Neben dem IC besteht ein solcher Sensortransponder nur aus einer Leiterplatte. Mit einem Gewicht von etwa 250 µg, von denen der überwiegende Anteil Silizium ist, wird die Schädlichkeit des ICs als vernachlässigbar eingestuft. Um einen abbaubaren Sensortransponder zu realisieren, muss daher eine abbaubare Leiterplatte entwickelt und geeignet strukturiert werden.

III Entwicklung einer abbaubaren Leiterplatte

Für den abbaubaren Sensortransponder ist eine abbaubare Leiterplatte erforderlich. Auf dieser sollen die Antenne und der kapazitive Sensor realisiert werden. Dazu ist eine Strukturierung der Leiterplatte erforderlich.

Unser Aufbau umfasst eine einlagige Leiterplatte aus Holz und Eisen. Das Holz dient dabei als Trägerschicht. Eisen als Leiter ist mit 5,63 % das vierthäufigste Element in der Erdkruste [6]. Es wird daher davon ausgegangen, dass es für einen abbaubaren Sensorknoten unbedenklich ist. Zur Verbindung beider Schichten wird der abbaubare Schmelzkleber Caremelt von TITK genutzt.

Um die Strukturierung der einlagigen Leiterplatte zu evaluieren, wurde eine Teststruktur entsprechend Abb. 2 (oben) designt. Auf dieser befinden sich Leitungen mit verschiedener Breite zwischen 200 μm und 700 μm . Die strukturierte Leiterplatte ist in Abb. 2 (unten) dargestellt. Für die Fertigung wurde ein ProtoMat Fräsbohrplotter von LPKF genutzt, womit Leitungen bis zu einer Breite von 600 μm zuverlässig auf der abbaubaren Leiterplatte realisiert werden konnten. Damit wird zwar nicht die Strukturgröße von Leiterplatten aus konventionellen Materialien erreicht, für die angestrebte Anwendung ist diese Strukturgröße jedoch ausreichend. Die Eigenschaft der Abbaubarkeit der Leiterplatte wird durch die gewählten Materialien erfüllt.

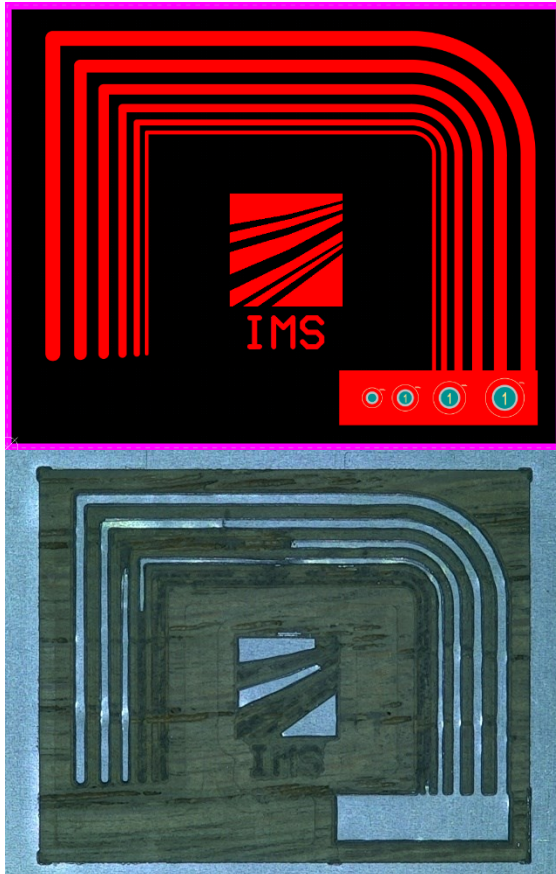


Abb. 2: Teststruktur auf abbaubarer Leiterplatte (Design oben, gefertigt unten): Die Teststruktur hat eine Größe von 20 mm $\times$ 25 mm. Die Breite der sechs Leitungen liegt in Schritten von 100 μm zwischen 200 μm und 700 μm . Die Löcher in der Teststruktur wurden in der dargestellten Version nicht gebohrt.

IV Design eines Sensortransponders zur Bestimmung der Bodenfeuchte

Der Sensortransponder basiert auf dem Transponder-IC *EM4152* von EM Microelectronics [5]. Dieser ist mit EPC Gen2 [3] kompatibel und kann zur Auslese eines kapazitiven Sensors von 0 pF bis 17 pF mit einer Auflösung von 7 Bit genutzt werden. Für den Sensortransponder muss das IC mit einer Antenne für den UHF-Bereich und einem kapazitiven Sensor zur Bestimmung der Bodenfeuchte verbunden werden.

Als Antenne wird ein mäandrierter Dipol genutzt. Dieser wurde in CST Studio designt und an die Impedanz des Transponder-ICs angepasst.

Der kapazitive Sensor wurde ebenfalls in CST Studio designt. Er besteht aus zwei rechteckigen Flächen. Wie in Abb. 3 zu sehen, erstreckt sich das elektrische Feld zwischen beiden Metallflächen auch über diese und ragt so deutlich in die Umgebung hinein. Wird der kapazitive Sensor in den Erdboden eingebracht, verläuft ein Teil des elektrischen Felds durch den Erdboden.

Die Gesamtkapazität des Sensors C_{Sense} wird als Parallelschaltung zweier Kapazitäten modelliert, wobei das Feld einer Kapazität C_0 innerhalb des Dielektrikums liegt und die andere Kapazität C_1 außerhalb des Sensors durch den Erdboden verläuft. Die erste Kapazität wird als konstant angenommen. Da Wasser eine deutlich größere relative Permittivität aufweist als trockene Erde, ändert sich die Kapazität des Sensors in Abhängigkeit der umgebenden Bodenfeuchte. In Abb. 4 ist die simulierte Änderung der Kapazität in Abhängigkeit der relativen Permittivität der Umgebung des Sensors dargestellt. Es zeigt sich ein linearer Verlauf von C_{Sense} über der relativen Permittivität der Umgebung des Sensors.

Um über C_{Sense} die Bodenfeuchte zu bestimmen, kann die Topp-Gleichung verwendet werden, die den Zusammenhang zwischen relativer Permittivität des Erdbodens und dessen volumetrischem Wassergehalt als rationale Funktion dritten Grades modelliert [8]. In Abb. 5 ist der Verlauf von C_{Sense} über dem volumetrischen Wassergehalt θ_{VWC} dargestellt. Der vom Transponder-IC auswertbare Bereich bis 17 pF ermöglicht demnach einen Messbereich von θ_{VWC} bis etwa 50 %. Dies entspricht dem Messbereich handelsüblicher Sensoren zur Bestimmung der Bodenfeuchte [7].

Der gefertigte Sensortransponder ist in Abb. 6 abgebildet. Er wurde derart gestaltet, dass ein einfaches Einbringen in den Boden möglich ist. Die Antenne am oberen Ende des Transponders bleibt im Einsatz über dem Boden. Der kapazitive Sensor befindet sich am unteren Ende des Transponders. Er ist mit einer schwarzen

Schutzhülle überzogen. Diese stellt einen Abstand zwischen den Metallflächen des Sensors und dem Boden her, der verhindert, dass der Sensor bei hoher Bodenfeuchte zu früh in Sättigung geht. Außerdem wird der kapazitive Sensor auf diese Weise vor einer leitfähigen Verbindung der Metallflächen durch den Erdboden geschützt.

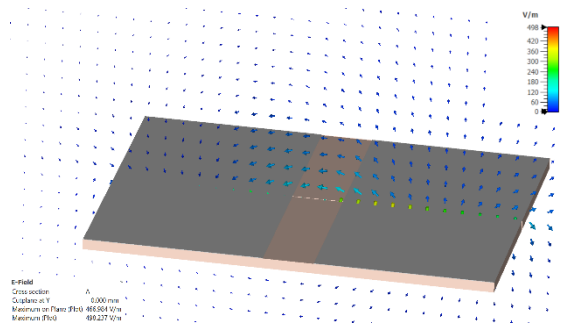


Abb. 3: Elektrisches Feld in der Umgebung des kapazitiven Sensors simuliert mit CST Studio.

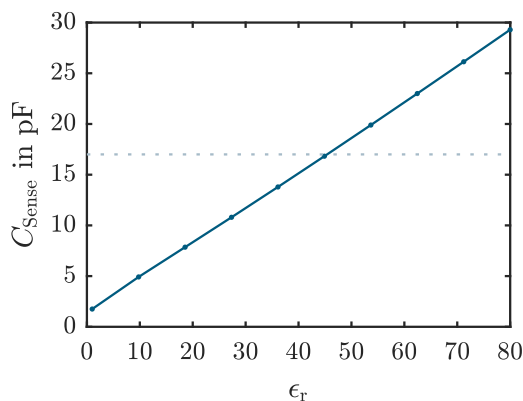


Abb. 4: Simulierte Änderung der Kapazität des Sensors mit der relativen Permittivität der Umgebung.

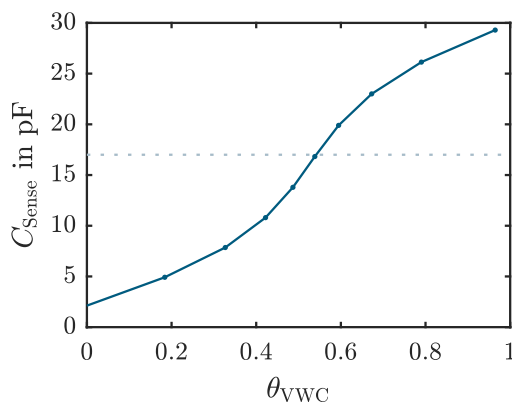


Abb. 5: Simulierte Änderung der Kapazität des Sensors mit dem volumetrischen Wassergehalt θ_{vwc} des Bodens.



Abb. 6: Sensortransponder gefertigt aus konventionellen Materialien: Das Transponder-IC und der kapazitive Sensor befinden sich unter der schwarzen Schutzhülle.

V Messergebnisse

Zur Untersuchung, inwieweit der entwickelte Sensortransponder zur Bestimmung der Bodenfeuchte geeignet ist, wurde dieser in einem kleinen Blumentopf von 11 cm Durchmesser etwa 5 cm tief in trockener Erde platziert. Ein RFID-Lesegerät wurde in einem Abstand von etwa 20 cm aufgestellt und mit einem Computer verbunden. Über diesen wurde der Sensorwert des Transponders mit einem Abtastintervall von 5 s ausgelesen. Nach 30 s wurde der Boden befeuchtet und die Trocknung über einen Zeitraum von etwa 5 Tagen aufgezeichnet.

Abb. 7 zeigt die aufgezeichneten Messwerte. Um der geringen Digitalisierungsauflösung (7 Bit) des Transponder-ICs entgegenzuwirken, wurde ein gleitender Mittelwert über jeweils 20 aufeinanderfolgende Datenpunkte gebildet. Die kleine Darstellung innerhalb von Abb. 7 zeigt die Rohdaten aus den ersten 5 Minuten ohne Filterung.

In den ersten 30 s vor der Zugabe des Wassers bleibt die Kapazität des Sensors konstant. Mit der Zugabe steigt der Wert schlagartig an, bevor er über den Zeitraum von etwa 1 min zügig abfällt. In diesem Zeitraum wurde das Wasser von der Erde aufgenommen. Danach fällt der Messwert in Übereinstimmung mit einer langsamen Trocknung ab. Jeweils gegen Mittag ist eine deutlichere Änderung des Messwerts zu erkennen, die vor allem an Tag 3 besonders ausgeprägt ist. In diesem Zeitraum kam es zu direkter Sonneneinstrahlung auf den Blumen-

topf, was die Trocknung vermutlich beschleunigte. Zum Ende der Messreihe erreichte der Sensor wieder einen Wert nahe dem des trockenen Bodens.

VI Diskussion und Ausblick

Die Messergebnisse zeigen, dass der Sensortransponder den Trocknungsvorgang im Boden erkennen kann. Der Verlauf der Messwerte ist plausibel, wie beispielsweise durch die starken Veränderungen zur Mittagszeit oder den Fakt, dass am Ende der Messung nach 5 Tagen wieder ungefähr der Startwert erreicht wurde, deutlich wird.

Mit einem Dynamikbereich von 4 pF bis 8 pF wird nur ein Teil der nutzbaren 17 pF des Transponder-ICs ausgenutzt. Verbunden mit der geringen Samplingtiefe des Transponder-ICs von 7 Bit ist die Auflösung des Sensors zunächst gering. Da die Messwerte zusätzlich statistischen Schwankungen unterliegen und die Messung in hoher Geschwindigkeit wiederholt werden kann, ermöglicht eine geeignete Filterung, die Auflösung der Messung zu verbessern.

Ob die Ausschläge gegen Mittag nur auf eine beschleunigte Trocknung zurückzuführen sind, oder der Sensortransponder auch eine Temperaturabhängigkeit aufweist, bedarf weiterer Untersuchung. Über die Topp-Gleichung und Messungen mit Referenzsensoren muss die Beziehung zwischen der Kapazität des Sensors und dem volumetrischen Wassergehalt des Bodens ermittelt werden. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, inwieweit auch die Art des Bodens die Messung beeinflusst.

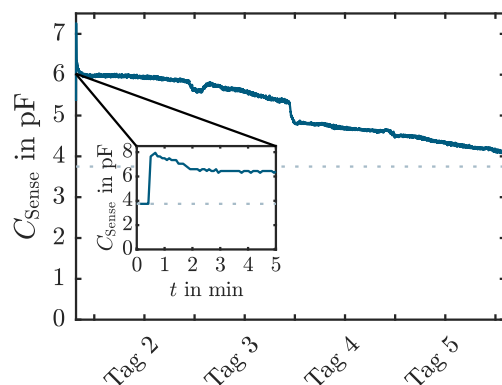


Abb. 7: Vom Sensortransponder mit einem Abtastintervall von 5 s erfasste Kapazität des Bodenfeuchtesensors: Für die Messreihe über etwa 5 Tage wurde der gleitende Mittelwert über jeweils 20 aufeinanderfolgende Datenpunkte berechnet. Die kleine Darstellung über 5 min zeigt unfilterte Rohdaten.

In unseren bisherigen Versuchen und Simulationen hat sich herausgestellt, dass die Dicke der Schutzschicht einen wesentlichen Einfluss auf den Wertebereich des Sensors hat. Mit einer zu dünnen Schicht sättigt der Sensor bei hoher Bodenfeuchte. Mit einer zu dicken Schicht wird die Sensitivität eingeschränkt. Die Dicke der Schutzschicht muss daher entsprechend eingestellt werden. Zudem muss die Schwankung über verschiedene Transponder gering bleiben, um ein gleichbleibendes Verhalten sicherzustellen. Gleichzeitig ist die Schutzschicht in direktem Kontakt zur Umgebung. Für die Realisierung des abbaubaren Sensortransponders muss auch sie abbaubar sein, während sich die Dicke der Schicht über die Betriebsdauer des Sensortransponders hinweg jedoch nur geringfügig ändern sollte. Dies stellt eine zentrale Herausforderung für das Design eines abbaubaren kapazitiven Sensortransponders dar.

In einem nächsten Schritt soll der Sensortransponder auf der abbaubaren Leiterplatte gefertigt werden. Dadurch wird, verbunden mit einer geeigneten Schutzschicht, ein abbaubarer Sensorknoten zur Bestimmung der Bodenfeuchte entstehen. Um die Funktion über eine Pflanzperiode sicherzustellen, werden wir dabei verschiedene Materialien zur Verkapselung des Sensortransponders untersuchen.

Wie in Abschnitt II dargestellt, haben wir die Verwendung eines Transponder-ICs aufgrund der geringen Masse von etwa 250 µg und des hohen Anteils von Silizium als unbedenklich erachtet. Diese Annahme bedarf weiterer kritischer Reflexion, da in modernen CMOS-Prozessen neben dem Silizium diverse andere Stoffe zum Einsatz kommen, die in Teilen auch in kleiner Konzentration bedenklich sein können.

Um das Transponder-IC mit der abbaubaren Leiterplatte zu verbinden, kommen verschiedene Prozesse in Frage. Auch hier werden potenziell bedenkliche Substanzen, wenngleich in sehr geringen Mengen, eingesetzt. Für die Bewertung der Unbedenklichkeit gilt es daher, neben dem IC auch die Verbindungstechnik zu betrachten.

Die bisherigen Ergebnisse bilden eine vielversprechende Grundlage und bestätigen das Potenzial abbaubarer Sensortransponder mit kapazitivem Sensor zur Etablierung nachhaltiger Messtechnik in der Landwirtschaft.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031B1598 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Projekt FarmScan wurde im Rahmen des Green ERA-Hub durchgeführt, einer Koordinierungs- und Unterstützungsmaßnahme (CSA), die durch das Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizont Europa“ der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 101056828 gefördert wurde.

Literaturnachweis

- [1] S. S. Sethi, M. Kovac, F. Wiesemüller, A. Miriyev und C. M. Boutry, „Biodegradable sensors are ready to transform autonomous ecological monitoring“, *Nature Ecology & Evolution* 6, 2022, doi: 10.1038/s41559-022-01824-w.
- [2] S. Voigt, A. Willert, W. Mende, T. Zschau, T. Oehme und R. Zichner, „Environmental friendly and low cost monitoring system for plant and agriculture fields“, *2023 Smart Systems Integration Conference and Exhibition (SSI)*, 2023.
- [3] GS1, „EPC Radio-Frequency Identity Generation-2 UHF RFID Standard“, Version 3.0, 2024.
- [4] M. A. Alsultan, J. Melià-Seguí, J. Parrón-Grados und S. López-Soriano, „A Battery-Less UHF RFID Sensor for Soil Moisture Monitoring“, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2025, doi: 10.1109/JRFID.2025.3572843.
- [5] EM Microelectronic-Marin SA, „RAIN RFID TRANSPONDER IC WITH CAPACITIVE SENSOR INTERFACE“, März 2021, Version 4.2.
- [6] W. M. Haynes, „Abundance of Elements in the Earth's Crust and in the Sea“, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97th edition (2016–2017), sec. 14, pg. 17.
- [7] truebner, „SMT50 Bodenfeuchtesensor“, Januar 2018.
- [8] G. C. Topp, J. L. Davis und A. P. Annan, „Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines“, *Water Resour. Res.*, 1980, doi:10.1029/WR016i003p00574.