

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Diese Arbeit untersucht die Eignung des Einsatzes der elektrischen Impedanzspektroskopie in Kombination mit maschinellem Lernen (ML) mithilfe einer Support Vector Machine (SVM) für die Detektion von Nitrat-N in Bodenproben. Ziel der kombinierten Anwendung der Technologien soll es sein, ein zukünftiges In-situ-Messgerät für die Landwirtschaft zu entwickeln, das ermöglicht, die Nitratkonzentration im Boden ortsaufgelöst zu detektieren, was eine gezielte Düngung und den damit verbundenen Schutz unseres Grundwassers ermöglicht. Als Grundlage hierfür werden verschiedenen Bodenproben mit verschiedenen Konzentrationen an Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ ) im Bereich von 0 - 50 mg-N/kg angesetzt. Der obere Grenzwert an Nitrat-N orientiert sich dabei an den gesetzlichen Vorschriften. Für die Validierung der elektrischen Impedanzspektroskopie wird eine Messzelle, angelehnt an einen Plattenkondensator, mit zwei Edelstahlelektroden und einem PTFE-Gehäuse verwendet, zwischen welche die zu testenden Bodenproben eingefüllt werden. Insgesamt werden zehn verschiedene MUTs in einem Frequenzbereich von 20 Hz bis 1 MHz charakterisiert.

Zu Beginn wurde trockener Quarzsand bei verschiedenen Nitratkonzentrationen mehrfach vermessen. Dabei hat sich eine sinkende Tendenz des Betrags  $|Z|$  sowie eine steigende Tendenz der Konduktanz  $G$  der Messwerte mit steigender Konzentration an Nitrat über einen großen Teil des Frequenzbereiches ergeben. Es hat sich jedoch bei allen Messwiederholungen eine starke Streuung in den Ergebnissen gezeigt, sodass benachbarte Nitratkonzentrationen nicht immer differenzierbar und damit nicht eindeutig zuordenbar waren. Im weiteren Verlauf wurde die Störgröße Bodenfeuchtigkeit im Bereich von 2 – 16 Vol.% untersucht. Hierbei hat sich die Tendenz aus den Messungen mit trockenem Quarzsand nochmals bestätigt. Das impedimetrische Verhalten der Messdaten ließ sich darüber hinaus sehr gut mithilfe von elektrischen sowie elektrochemischen Ersatzschaltbildern mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9923$  nachbilden. Auch bei Schwankungen der Füllhöhe der Messzelle lässt sich das Verhalten der Impedanz präzise durch eine Modellfunktion vorhersagen. Als weitere Störgröße wurde die Variation der Bodenzusammensetzung mit einem Tonanteil von 25 Massenprozent untersucht. Ebenso wie in den Messungen davor konnte eine Erhöhung der Nitratkonzentration mit den Ergebnissen detektiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Resultate der Messungen darauf hindeuten, dass der verwendete Messaufbau sowie die elektrische Impedanzspektroskopie das Potential haben, die Nitrat-N Konzentration in Bodenproben zu ermitteln. In Anbetracht der verschiedenen Störgrößen ist jedoch vor der Anwendung immer eine Kalibrierung des Messsystems erforderlich, was wiederum Zeit und Aufwand kostet und somit die In-situ-Anwendung erschwert.

Um dieses Problem zu umgehen, wurde der kombinierte Einsatz mit einer SVM getestet. Die Ergebnisse im Falle einer Klassifizierung in die vier verschiedenen Gruppen, welche bereits für die Klassifizierung des Grundwassers nach dem EU-Nitratmessnetz verwendet werden, ergaben sehr hohe Genauigkeiten in der Zuordnung. Es konnten unter Einbezug aller Mess- und Störgrößen Genauigkeiten von bis zu 97,8 % in der Validierung des erstellten Zuordnungsmodells erzielt werden. Somit lässt sich sagen, dass der Einsatz von maschinellem Lernen prinzipiell dafür geeignet ist, Nitrat-N in Bodenproben unter der Vielzahl an auftretenden Störgrößen zu detektieren, um eine aufwendige Kalibrierung des Messsystems zu umgehen.

Trotz der bisher optimistischen Ergebnisse ist noch eine Vielzahl an Störgrößen auf diesem Gebiet nicht ausreichend untersucht. In dieser Arbeit wurden zum Beispiel die Parameter Temperatur und Schüttdichte der vermessenen MUTs weitgehend konstant gehalten. Beide Einflussgrößen schwanken in der Realität jedoch. Auch die Variation des Bodens wurde innerhalb dieser Arbeit nur teilweise abgedeckt. Für eine später feldfähige Anwendung müssen sämtliche Variation wie Blumenerde, Braunerde und Tonmischungen bekannt und getestet sein. Als eine der zukünftig größten Hindernisse ist noch der Einfluss von verschiedenen Ionenarten zu charakterisieren, wie sie in der Realität auch im Boden vorhanden sind. Es ist also noch ein breites Feld an Störgrößen zu untersuchen.

Ebenso könnten dynamische Messungen bei einer festen Frequenz in Betracht kommen, um die Messdauer zu verringern und somit die landwirtschaftliche Anwendung in Echtzeit zu ermöglichen. Als Bedingung hierzu müsste der Messaufbau an die dynamischen Gegebenheiten angepasst werden. Auch eine Verringerung des Plattenabstandes der Messzelle kann hier in Betracht gezogen werden, um das Messsignal zu verstärken.

Im Bereich des maschinellen Lernens wäre in Zukunft ein Wechsel von der Klassifikation zu einer stetigen Einteilung, also eine Regression, in Nitratkonzentrationen erforderlich, um solch eine präzise Regelung der Nitratdüngung zu erreichen. Hierzu ist erforderlich, dass eine Vielzahl an verschiedenen Nitratkonzentrationen über das Spektrum der gesamten Störgrößen vermessen ist. Zusätzlich bietet sich der Test von weiteren Methoden des maschinellen Lernens an. Gerade im Hinblick auf die Vielzahl an Messwerten und Störgrößen eignet sich eine Methode mit sogenanntem Langzeitgedächtnis (engl.: long short-term memory) aus dem Bereich der KI. In [44] wurde diese Methode bereits für dieselbe Anwendung mit vielversprechenden Ergebnissen verwendet.

Für den zukünftigen Einsatz einer solchen In-Situ-Nitratüberwachung ist zudem seitens der Ämter, wie z.B. dem Umweltbundesamt oder der bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft,

eine genauere Angabe an Grenzwerten erforderlich, um die Forschung auf diesem Gebiet voranzutreiben. Die Angabe der bisherigen Grenzwerte sowie der Düngeregelungen für landwirtschaftliche Flächen erfolgt, wie in [24] zu sehen, nur mangelhaft.

Abschließend lässt sich sagen, dass diese Arbeit, also die Kombination von elektrischer Impedanzspektroskopie mit den Methoden des maschinellen Lernens, eine gute Grundlage für die Detektion und Analyse von Nitratkontaminationen unserer landwirtschaftlichen Böden bietet. Diese Anwendung ermöglicht es uns, die Probleme der Grundwasserverschmutzung anzugreifen und somit zukünftig die Qualität unserer Wasserressourcen sowie die damit verbundene Gesundheit von Lebewesen zu schützen.