

Eignung von Nahinfrarotsensoren für die Charakterisierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern unter On-Farm-Bedingungen

Hans-Werner Olf, Charlotte Höpker

Kurzfassung

Flüssige Wirtschaftsdünger sind für eine nachhaltige Pflanzenproduktion unerlässlich, da sie Pflanzennährstoffe liefern, den Einsatz von Mineraldüngern verringern und die Bodenfruchtbarkeit fördern. Aufgrund der variablen Zusammensetzung ist eine genaue Nährstoffanalyse unerlässlich. Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) hat sich bereits als Messtechnik in vielen Anwendungsbereichen etabliert, so auch bei der Laboranalyse von Gülle. Mehrere Hersteller bieten NIRS-Sensoren für den Einsatz in landwirtschaftlichen Betrieben an, da diese Technik Möglichkeiten für eine optimierte Ausbringung von Gülle bietet. Aus praktischen Studien und DLG-Testergebnissen lässt sich jedoch schließen, dass Verbesserungen bei der NIRS-Kalibrierung erforderlich sind. Darüber hinaus könnte die Zuverlässigkeit der NIRS-Sensoren durch Anwenderschulungen und die Einrichtung eines Qualitätssicherungssystems erhöht werden.

Schlüsselwörter

Gülleausbringung, Nährstoffgehalte, NIRS

Suitability of near-infrared sensors for the characterization of liquid organic manures under on-farm conditions

Hans-Werner Olf, Charlotte Höpker

Abstract

Liquid farm manures are essential for sustainable crop production as they provide plant nutrients, reduce the use of mineral fertilizers and promote soil fertility. Due to the variable composition, precise nutrient analysis is essential. Near-infrared spectroscopy (NIRS) is already established as a measurement technique in many areas of application including lab analysis of liquid farm manure. Several manufacturers already offer NIRS sensors for on-farm use as this technique offers opportunities for the optimized application of liquid manures. However, based on practical studies and DLG test results, it can be concluded that improvements in NIRS calibrations are necessary. In addition, the reliability of NIRS sensors might be increased through user training and the establishment of a quality assurance system.

Keywords

NIRS, Nutrient concentrations, Slurry application

Flüssige Wirtschaftsdünger: Chancen und Herausforderungen

Die effiziente Nutzung von organischen Düngemitteln ist ein wesentlicher Bestandteil der globalen Pflanzenproduktion. Diese auf landwirtschaftlichen Betrieben verfügbaren Ressourcen enthalten für das Pflanzenwachstum wichtige Makro- und Mikronährstoffe. Weiterhin reduziert ihr Einsatz den Bedarf an mineralischen Düngemitteln, wodurch endliche Ressourcen wie Phosphor und Kalium geschont werden und der Verbrauch fossiler Brennstoffe für die Ammoniaksynthese gesenkt wird. Organische Düngemittel setzen Nährstoffe schrittweise frei, was eine ausgewogene Nährstoffversorgung fördert. Zusätzlich enthalten sie organische Substanz, die den Humusgehalt des Bodens aufrechterhält, die Bodenstruktur verbessert und die biologische Aktivität steigert. Dies führt zu besserer Wasserinfiltration, Wasserhaltekapazität und gesteigerter Bodenfruchtbarkeit. Ein weiterer Vorteil ist die Kosteneffizienz, da organische Düngemittel oft kostenlos oder günstiger als mineralische Alternativen sind, da sie Nebenprodukte aus Tierhaltung oder Biogasanlagen darstellen. Unsachgemäße Anwendung führt jedoch oft zu Überdüngung, was Umweltprobleme wie beispielsweise Eutrophierung von Gewässern und oder Eintrag von Nitrat in das Grundwasser verursacht.

Flüssiger Wirtschaftsdünger („Gülle“) entsteht in der Tierhaltung und bei der Vergärung in Biogasanlagen [1]. Im Jahr 2020 wurden in Deutschland etwa 190 Millionen m³ auf Ackerflächen ausgebracht [2], vor allem Rindergülle (95 Mio. m³), Biogasgärreste (63 Mio. m³) und Schweinegülle (28 Mio. m³). Zu beachten ist, dass die Nährstoffzusammensetzung dieser Wirtschaftsdünger aufgrund von Faktoren wie Tierart, Haltungssystem, Futterzusammensetzung sowie Einstreumaterial und Wasserzufuhr stark variiert [3; 4]. Für einen am pflanzlichen Bedarf orientierten Einsatz ist es daher unbedingt erforderlich, die Nährstoffzusammensetzung der flüssigen Wirtschaftsdünger vor der Anwendung genau zu kennen [5].

Es gibt verschiedene Methoden zur Bestimmung der Nährstoffkonzentration in flüssigen Wirtschaftsdünger [6; 7]. Auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland werden Tabellenwerte offizieller Beratungseinrichtungen verwendet, da diese kostenfrei zur Verfügung stehen. Allerdings können diese Werte aufgrund spezifischer Produktionsbedingungen (u.a. Haltungsform, Fütterungsstrategie) stark von den tatsächlichen Nährstoffgehalten abweichen. Alternativ können Proben im Labor analysiert werden, was genaue Ergebnisse liefert, aber kosten- und zeitintensiv ist und häufig durch unsachgemäße Probenahme zu unzuverlässigen Werten führen kann [8]. Eine weitere Möglichkeit ist die Vor-Ort-Analyse [6; 7; 9], z. B. mit Geräten wie dem Quantofix-N-Volumeter oder dem Agros Nova, die den Ammonium-Stickstoffgehalt direkt anzeigen [10; 11].

Nahinfrarotspektroskopie zur Analyse von flüssigen Wirtschaftsdüngern im Labor

Als vielversprechendes Verfahren für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben wird die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS), die beispielsweise bereits für die Analyse von Futtermitteln etabliert ist, angesehen. Bei dieser Messtechnik wird die Probe mit Licht im Wellenlängenbereich von 800 bis 2500 nm bestrahlt [12]. Dadurch werden die sogenannten Kombinations- und Oberschwingungsbanden der OH-, NH- und CH-Bindungen in Bewegung gesetzt [13]. Die

Wechselwirkung der Strahlung mit den Bestandteilen der Probe führt zu unterschiedlichen Anteilen von Lichtreflexion, Transmission und Absorption [12]. Bei flüssigen Proben mit einer hohen Partikelkonzentration, wie dies bei flüssigen Wirtschaftsdüngern der Fall ist, wird durch die suspendierten Partikel ein Teil des einfallenden Lichts reflektiert und an den NIR-Detektor weitergeleitet (**Bild 1**).

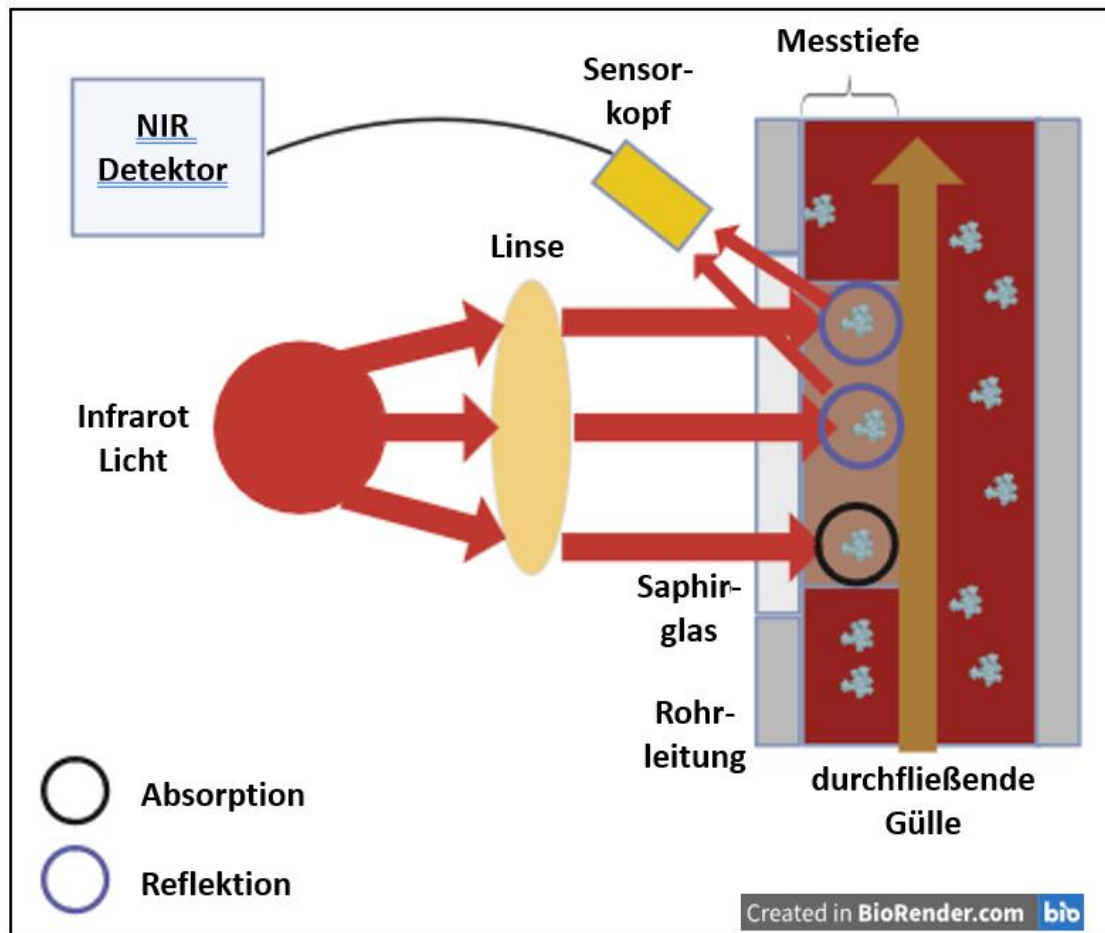


Bild 1: Schematische Darstellung einer NIRS Messung bei flüssigen Wirtschaftsdüngern.

Figure 1: Schematic diagram of a NIRS measurement for liquid organic manures.

Nach der Aufnahme der NIRS-Spektren und den dazugehörigen Laborwerten wird mit Hilfe eines Regressionsmodells eine mathematische Beziehung ermittelt. Für die Interpretation der Spektren stehen komplexe chemometrische Methoden zur Verfügung. Häufig werden mehrere Vorverarbeitungsmethoden auf die gesamten Spektren oder ausgewählte Wellenlängen der Spektren angewandt, um Signale um Rauschen zu korrigieren, Grundlinienverschiebungen zu entfernen oder die Datengröße zu reduzieren, bevor die endgültige statistische Analyse durchgeführt wird [14]. Nach dem Vorverarbeitungsschritt muss ein Regressionsmodell erstellt werden. Dazu muss eine zuverlässige mathematische Beziehung zwischen den Spektren und den entsprechenden Werten für die analysierten Referenzproben gefunden werden.

Der wichtigste Vorteil der NIRS-Technik ist die schnelle und berührungslose Messung [1; 6]. Darüber hinaus werden für die Messung keine Chemikalien oder risikoreiche Strahlungsbereiche benötigt, so dass die Analyse keine Risiken für Mensch und Umwelt während der Untersuchung birgt [15]. Weitere Vorteile der NIRS-Technik sind, dass die Nährstoffe kontinuierlich und mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand bestimmt werden und die Informationen über die Inhaltsstoffe sofort zur Verfügung stehen. Als Nachteile werden die aufwendige Entwicklung und Pflege der NIRS-Kalibrationen sowie die unabdingbare und arbeitsintensive Qualitätssicherung gesehen [8]. Zu beachten ist weiterhin, dass bei der Nahinfrarotspektroskopie die Genauigkeit stark vom Zustand der Probe (z.B. Partikelgröße, Volumendichte, Temperatur) abhängt [16].

Unter Laborbedingungen ist die Nahinfrarotspektroskopie technisch gut geeignet für die Charakterisierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern [10; 14; 17 - 25]. Verschiedene Studien (**Tabelle 1**) zeigen beispielsweise eine hohe Vorhersagegenauigkeit für den Trockenmassegehalt (TM) sowie die Bestimmung von Gesamtstickstoff (TN) und Ammoniumstickstoff (AN). Die Bestimmung von Phosphor (P) und Kalium (K) erweist sich hingegen als weniger zuverlässig. Während P in mehreren Studien mit akzeptablen Korrelationen ermittelt wurde, fehlten in anderen Untersuchungen akzeptable Übereinstimmungen. Kalium konnte in zwei Studien gar nicht zuverlässig bestimmt, während einige andere Studien gute Ergebnisse zeigten. Horf et al. [14] weisen darauf hin, dass die Genauigkeit der Vorhersagen auch von den verwendeten Algorithmen für die Spektrenbewertung sowie die chemometrischen Analyseverfahren die Ergebnisse beeinflusst werden. Zukünftig könnten KI-basierte Algorithmen die Auswertung der Spektren weiter verbessern. Der Einsatz der NIRS-Messtechnik direkt auf landwirtschaftlichen Betrieben könnte somit eine gezieltere Nutzung der flüssigen Wirtschaftsdünger ermöglichen [1].

On-farm-Tests von NIRS-Sensoren zur Nährstoffmessung in flüssigen Wirtschaftsdüngern

Obwohl NIRS offensichtlich für die Charakterisierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern geeignet ist, muss berücksichtigt werden, dass die meisten Studien bisher unter kontrollierten Bedingungen im Labor stattfanden, während nur sehr wenige Studien tatsächlich auf landwirtschaftlichen Betrieben unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt wurden.

In den von Zimmermann et al. [26] durchgeführten Versuchen wurde ein NIRS-System zur Online-Überwachung der Nährstoffkonzentration während der Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern auf einem 18 m³ Güllewagen montiert. Für diese Tests wurden verschiedene Güllearten verwendet (Rinder- bzw. Schweinegülle, Biogasgärreste). Eingesetzt wurde ein Polytec PSS 1720 NIR-Spektrometer, das einen Wellenlängenbereich von 850 bis 1650 nm abdeckt. Referenzproben wurden über ein Probenahmeventil entnommen und anschließend in einem akkreditierten Labor analysiert. Das NIRS-System zeigte reproduzierbare Ergebnisse und es wurden hohe Korrelationskoeffizienten zwischen Labor- und NIRS-Werten für TM, TN, AN, P und K berechnet ($R^2=0,95 - 0,99$).

In einer Studie von Stenberg und Gustafson [27] wurden 73 Milch-, Schweine- und Biogasgülle in einem Prüfstand, der einen realen Gülleverteiler simuliert, analysiert. Darüber hinaus wurden 13 Biogasgülle während der Ausbringung auf dem Feld analysiert. Für diese Versuche wurde ein NIR-Sensor von Tec5 (Oberursel) mit einem PGS-NIR1.7 Detektor der Carl Zeiss AG (Jena) verwendet. Auf dem Prüfstand wurde der NIRS-Messkopf an einem 100-mm-Rohr befestigt und mit einem Behälter verbunden, der 100 Liter des flüssigen Wirtschaftsdüngers enthielt. Dieser wurde durch das Rohrsystem des Prüfstands gepumpt, um den Güllefluss in einem echten Gülleausbringgerät zu simulieren. Jede Wirtschaftsdüngerart wurde bei drei verschiedenen Pumpraten analysiert, um die Robustheit der Kalibrierungen zu erhöhen. Für die Referenzanalyse wurden während der Umwälzung des flüssigen Wirtschaftsdüngers 1-Liter-Proben entnommen und im Labor analysiert. Während der Feldanwendung mit Biogasgülle wurden 38 Spektren von jeder Ladung aufgenommen. Insgesamt zeigten die Nährstoffkonzentrationen in Rindergülle bessere Vorhersagen als in Schweinegülle oder Biogasgärresten. Für die einzelnen Güllearten wurden folgende Korrelationskoeffizienten für die TM ermittelt: Rindergülle 0,90 (n=22), Schweinegülle 0,74 (n=27) und Biogasgärreste 0,67 (n=24). Für TN und AN gab es nur Ergebnisse für Rindergülle ($R^2=0,81$ und $0,44$) und Schweinegülle ($R^2=0,46$ und $0,24$). Für Phosphor lauteten die Korrelationskoeffizienten: Rindergülle 0,61 (n=22), Schweinegülle 0,57 (n=27) und Biogasgärreste 0,39 (n=24).

Thiessen et al. [28] bauten einen Prüfstand, auf dem sie fünf verschiedene NIRS-Sensoren installierten. Dieses System wurde auf 13 Betrieben in Norddeutschland getestet. Insgesamt wurden 51 verschiedene Wirtschaftsdünger beprobt, darunter Schweine-, Rinder-, Biogas- und Mischgülle. Die NIRS-Sensoren erreichten durchschnittliche Abweichungen von 22 - 23 % vom Referenzergebnis für TM. Für TN zeigten vier von fünf Sensoren Abweichungen von 24 - 38 %. Für die Parameter AN, P und K zeigten die Sensoren ähnlich hohe Abweichungen von 38 - 54 %, 36 - 69 % bzw. 25 - 72 %. Die guten Ergebnisse für TM sind auf die Beziehung zwischen Wasser und TM zurückzuführen [28], da Wasser zu starken Signalen im NIR-Spektrum führt. Thiessen et al. [28] deuten an, dass die Ergebnisse für die anderen Nährstoffe im Vergleich zu anderen Studien schlecht waren, weil die Sensoren unbekannte Proben unter nahezu realen landwirtschaftlichen Bedingungen gemessen haben und die Messwerte eventuell nicht gut in die bestehenden Kalibrierungsmodelle passten.

NIRS-Testverfahren für kommerziell erhältliche NIRS-Sensoren in Deutschland

Seit mehr als 15 Jahren werden NIRS-Sensoren für den Einsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben in Deutschland angeboten. Technisch möglich ist die Montage an stationären Pumpen, die zur Befüllung von Transportfahrzeugen für Gülle direkt am Güllelager oder Stall eingesetzt werden, bzw. direkt an den Ausbringfahrzeugen, die zur Applikation von flüssigen Wirtschaftsdüngern genutzt werden. Zu den drei relevanten Anbietern gehören John Deere GmbH & Co. KG (Walldorf), m-u-t GmbH (Wedel) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Gülletechnikherstellern und Dinamica Generale S.p.A. (Poggio Rusco, Italien). Die Güllepumpen oder Tankwagen mit der entsprechenden Sensortechnik werden entweder von Lohnunternehmern oder von den Landwirten selbst betrieben.

Die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) führt Tests für die Parameter TM, TN, AN, P und K unter betriebsnahen Bedingungen durch, um die Gleichwertigkeit mit Laboranalysen nach amtlich anerkannten Methoden zu ermitteln. Für diese Untersuchungen werden fünf typische flüssige Wirtschaftsdünger aus verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben anhand des Trockensubstanzgehaltes ausgewählt (Rindergülle mit 4 - 9 % TS, Schweinegülle mit 2 - 7 % TS und Gärreste mit 5 - 8 % TS). Für jeden Test wird eine Menge von 3 bis 5 m³ in einen Behälter gepumpt. Die zu prüfenden Sensoren und ein Bypass für die Entnahme der Laborreferenzprobe werden dann an das Schlauchsystem angeschlossen. In einem ersten Schritt wird der flüssige Wirtschaftsdünger durch kontinuierliches Pumpen gründlich homogenisiert. Sobald die angezeigten Messwerte der NIRS-Sensoren stabil sind, werden die NIRS-Daten dokumentiert und über den Bypass Proben für die Referenzanalyse im Labor entnommen. Die Proben werden unmittelbar nach der Entnahme bei -18 °C tiefgefroren und zur Analyse an fünf verschiedene akkreditierte Labore geschickt. Die relative Abweichung des Sensorwertes für jeden Parameter im Vergleich zum Referenzwert wird dann zur Validierung der Messgenauigkeit der NIRS-Sensoren verwendet. Die einzelnen Parameter eines Wirtschaftsdüngertyps werden nach einem von der DLG-Prüfstelle entwickelten Kriterienkatalog zertifiziert (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: DLG-Bewertungsschema zur Beurteilung von NIRS-Sensoren für die Charakterisierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern.

Table 1: DLG evaluation scheme for the assessment of NIRS sensors for the characterization of liquid organic manures.

Symbol	Beurteilung	
++	sehr gut bestanden	4 von 5 Wertepaare innerhalb einer Gülleart ≤ 10 % und keine Abweichung > 20 % rel.
+	gut bestanden	4 von 5 Wertepaare innerhalb einer Gülleart ≤ 15 % und keine Abweichung > 25 % rel.
o	bestanden	3 von 5 Wertepaare innerhalb einer Gülleart ≤ 25 % und keine Abweichung > 35 % rel.
-	nicht bestanden	nicht bestanden

Die Bewertung der drei kommerziell erhältlichen NIRS-Sensoren für die Nutzung auf landwirtschaftlichen Betrieben zeigt, dass die Messgenauigkeit je nach Parameter und Wirtschaftsdüngertyp variiert (s. **Tabelle 2**). Für die TM-Bestimmung in Rindergülle erhielten die Sensoren von m-u-t GmbH und John Deere eine „gute“ Bewertung. Bei TN und AN erzielte der Harvestlab 3000 von John Deere als einziger eine „sehr gute“ Bewertung für Rindergülle. Für K erfüllten zwei Sensoren die Anforderungen, während für P nur der Sensor von m-u-t GmbH mit „sehr gut“ abschnitt. Für Schweinegülle lieferten je 1 Sensor „gute“ bzw. „sehr gute“ Ergebnisse für TM, während keine Daten für den Dinamica Generale Sensor verfügbar sind. TN konnte von allen Sensoren bestimmt werden, während für AN und K Unterschiede in den Bewertungen sowie fehlende Daten auffielen. Für P erzielte nur der Sensor von John Deere eine zuverlässige Messung. Bei Biogasgülle bestanden zwei Sensoren den TM-Test, während für den John Deere NIRS-Sensor keine Daten vorliegen. Die TN-Bestimmung wurde für die John Deere und m-u-t GmbH Sensoren mit der Bewertung „gut“ bewertet, bei AN und P variieren die Bewertungen stark, wobei der Sensor von Dinamica Generale für P und K „sehr gute“ Ergebnisse erreichte. Insgesamt zeigt sich eine teils deutliche Varianz in der Genauigkeit der

NIRS-Sensoren, abhängig von Hersteller, Parameter und Wirtschaftsdüngertyp mit unvollständigen Daten für einige Sensoren und Parameter.

Tabelle 2: Zusammenstellung ausgewählter DLG-Prüfberichte für NIRS-Sensoren (Beurteilungskriterien s. **Tabelle 1**; n. v. = Angabe nicht verfügbar) [29; verändert].

Table 2: Compilation of selected DLG test reports for NIRS sensors (see **Table 1** for evaluation criteria; n.a. = information not available) [29; modified].

	m-u-t GmbH	John Deere	Dinamica Generale S.p.A.
Sensor	NIR speedspy onboard manure	Harvestlab 3000	EVO NIR 4.0
DLG Test Nr.	7122 [30]	6886 [31] + 6887 [32] + 7281 [33]	7139 [34] + 7140 [35] + 7235 [36]
Rindergülle			
TM	+	+	o
TN	o	++	+
AN	o	++	n. v.
K	o	o	n. v.
P	++	o	o
Schweinegülle			
TM	++	+	n. v.
TN	o	o	o
AN	o	n. v.	n. v.
K	o	n. v.	o
P	-	o	n. v.
Biogasgärrest			
TM	o	n. v.	o
TN	+	+	o
AN	+	o	n. v.
K	o	o	++
P	-	n. v.	++

Zuverlässigkeit von NIRS-Messungen in landwirtschaftlichen Betrieben

Bei der Verwendung von NIRS-Sensoren für Anwendungen auf landwirtschaftlichen Betrieben gibt es einige Einflussfaktoren, die die Messung beeinflussen können und daher berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zur NIRS-Messung im Labor unter kontrollierten Bedingungen können unter Praxisbedingungen z.B. die Umgebungstemperatur, Bewegungen und Vibrationen der Maschinen, die Temperatur der zu messenden flüssigen Wirtschaftsdünger und die begrenzten Fähigkeiten nicht ausreichend geschulter Anwender eine wichtige Rolle spielen und die Messung mit den Sensoren und damit die Zuverlässigkeit der Messwerte beeinflussen.

Eine intensive Homogenisierung der flüssigen Wirtschaftsdünger kann die NIRS-Messung beeinflussen und damit die Zuverlässigkeit der ermittelten Werte verbessern, da diese sich schnell in der Regel entmischen (d.h., schwerere Bestandteile sinken zu Boden und leichtere Bestandteile bilden eine Schwimmschicht an der Oberfläche). Die feste Phase enthält hauptsächlich organisch gebundene Elemente in höheren Konzentrationen wie N und P, während AN und K in der flüssigen Phase gelöst sind. Eine gute Homogenisierung ist daher wichtig, denn je gleichmäßiger die Komponenten in dem flüssigen Wirtschaftsdünger verteilt sind, desto besser können die NIRS-Sensoren die Inhaltsstoffe messen, da die kleinräumige Heterogenität in der Wirtschaftsdünger geringer ist und daher keine sehr kurzfristigen Konzentrationschwankungen auftreten.

Beim Einsatz von NIRS-Sensoren im Labor werden sowohl die Messung als auch die Dokumentation und Interpretation der Messwerte von geschultem Personal durchgeführt, um fehlerhafte Messwerte zu minimieren. Darüber hinaus ist in akkreditierten Laboratorien eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung vorgeschrieben. Beim Einsatz von NIRS-Sensoren auf dem Betrieb sind hingegen viele verschiedene Personen involviert (z.B. Betriebsleiter*innen und Mitarbeitende landwirtschaftlicher Lohnunternehmer), die den Umgang mit den NIRS-Sensoren erlernen müssen, um zuverlässige Messungen zu ermöglichen. Dazu sind Offenheit und Bereitschaft der Beteiligten, sich mit der neuen Technologie vertraut zu machen, erforderlich. Dies ist besonders wichtig, da das Hauptaugenmerk von Lohnunternehmungen in der Regel nicht auf qualitativ hochwertigen Messungen liegt, sondern auf der Ausbringung einer bestimmten Menge an Nährstoffen mit Hilfe eines NIRS-Sensors. Regelmäßige Schulungen und Weiterbildungen in dieser Hinsicht können dazu beitragen, dass die Sensoren richtig bedient werden.

Da flüssige Wirtschaftsdünger in ihrer Zusammensetzung sehr unterschiedlich sind, sollte der Anwender wissen, welcher Wirtschaftsdüngertyp mit dem NIRS-Sensor gemessen werden soll, d.h. in welchem Bereich die TM- und Nährstoffkonzentrationen üblicherweise zu erwarten sind. Zu beachten ist auch, dass sich NIRS-Sensoren nur sehr bedingt für die Messung spezieller Wirtschaftsdünger eignen. So sind NIRS-Messwerte für flüssige Wirtschaftsdünger mit sehr niedrigem oder sehr hohem TM-Gehalt, Biogastrückstände aus Biogasanlagen mit hohem Eintrag von Hühnertrockenkot, Produktionsabfälle aus der Lebensmittelindustrie oder ähnliche Stoffe mit Vorbehalt zu sehen. Zusätze wie Tonminerale, Säuren, Eisen-III-Chlorid oder Nitrifikationsinhibitoren sowie physikalisch wirkende Maßnahmen wie Separation und massive Wasserzugabe (Verdünnung) verändern die Spektraleigenschaften von flüssigen Wirtschaftsdüngern zum Teil gravierend und machen eine NIRS-Messung unmöglich.

Vor- und Nachteile der NIRS-Messtechnik für die Prüfung von flüssigen Wirtschaftsdüngern

Die kontinuierliche Erfassung der Eigenschaften von flüssigen Wirtschaftsdüngern durch NIRS-Messungen während der Ausbringung auf dem Feld ermöglicht die gezielte Ausbringung einer vorher festgelegten Nährstoffmenge in kg pro Hektar (und nicht nur einer bestimmten

Kubikmeter Menge pro Hektar) auf eine Fläche. Der Sensor ermöglicht es, die Ausbringungsmenge während der Fahrt entsprechend der gemessenen Nährstoffkonzentrationen und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs anzupassen, und die ausgebrachte Nährstoffmenge wird automatisch dokumentiert. Basierend auf zuvor erstellten Applikationskarten ist auch eine variable Nährstoffausbringung innerhalb eines Feldes möglich [37]. So können z.B. Unterschiede in der Versorgung des Bodens oder des Pflanzenbestandes mit bestimmten Nährstoffen kompensiert werden. Wahrscheinlich würde sich die Ausbringung dann am pflanzenverfügbaren Stickstoff (d.h. dem AN-Gehalt) in der auszubringenden Wirtschaftsdüngern orientieren, da N für das Pflanzenwachstum in der laufenden Vegetationsperiode und letztlich für den Ertrag und die Qualität der Ernte von überragender Bedeutung ist. Der Bedarf an anderen Nährstoffen könnte dann durch eine gezielte Ausbringung von Mineraldüngern gedeckt werden.

Die Nachteile des Einsatzes von NIRS-Sensoren in landwirtschaftlichen Betrieben bestehen darin, dass die Messung nur bestimmte Parameter abdeckt und die Genauigkeit sowie die Reproduzierbarkeit der NIRS-Werte stark von der Qualität der Kalibrierung abhängen (d. h. von der Stärke der Beziehung zwischen den Labor- und NIRS-Werten und der Repräsentativität der für diese Kalibrierung verwendeten Proben). Auch die Kosten für den Einsatz eines NIRS-Systems müssen berücksichtigt werden. Diese entstehen für den landwirtschaftlichen Betrieb direkt beim Kauf des NIRS-Systems oder werden vom Lohnunternehmen indirekt über den Preis für die Gülleapplikation weitergegeben. Wie bereits erwähnt, ist das Spektrum der Parameter, die bei der Messung von flüssigen Wirtschaftsdüngern mit der NIRS-Technologie erfasst werden können, begrenzt. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Tierarten, Futtermittel oder Güllezusätze die Messung beeinflussen, so dass für jede Gülleart umfassende Kalibrierungsmodelle vorliegen müssen.

Um die Genauigkeit zu erhöhen, muss die Kalibrierung der Sensoren weiterentwickelt werden. Außerdem muss die Zuverlässigkeit der NIRS-Technologie im praktischen Einsatz weiter verbessert werden. So muss z.B. die Auswirkung unterschiedlicher Einbaulagen des NIRS-Sensors (insbesondere im Hinblick auf die sogenannte Druckseite im Vergleich zur Saugseite) evaluiert werden. Darüber hinaus sollten deutliche Abweichungen von den üblichen Standardwerten für einen bestimmten Wirtschaftsdüngertyp direkt auf dem Traktorterminal angezeigt werden. Durch die mehrmalige Beprobung mit nachfolgender Laboranalyse während einer Ausbringperiode für flüssige Wirtschaftsdünger könnten die so ermittelten Nährstoffgehalte mit den vom NIRS-Sensor gemessenen Werten vergleichen und gegebenenfalls die NIRS-Werte mit einem Korrekturfaktor nachjustiert werden.

Um das Potenzial der NIRS-Messtechnik in Zukunft optimal nutzen zu können, müssen die Kalibrierungen erweitert und verbessert werden. Eine regelmäßige Wartung und Überprüfung der technisch-physikalischen Eigenschaften der NIRS-Geräte durch eine unabhängige Organisation sollte ebenfalls implementiert werden. Um eine hohe Akzeptanz bei den Landwirten zu erreichen, sollte daher eine amtliche Qualitätssicherung für NIRS-Sensoren in der Praxis eingeführt werden (vergleichbar mit der verpflichtenden technischen Überprüfung von Pflanzenschutzspritzen). Nur so können verlässliche Ergebnisse (d.h. Nährstoffgehaltswerte, die

gut mit den Laborwerten übereinstimmen) erzielt werden, damit Nährstoffanalysen mit NIRS schlussendlich auch für eine verbesserte Anwendungsgenauigkeit und zu Dokumentationszwecken genutzt werden können.

Zusammenfassung

Unter Laborbedingungen hat sich die NIRS-Technologie als geeignet zur Charakterisierung flüssiger Wirtschaftsdünger erwiesen. Ihre Übertragbarkeit auf den landwirtschaftlichen Praxiseinsatz ist jedoch noch begrenzt. Studien unter praxisnahen Bedingungen zeigen deutliche Abweichungen, insbesondere bei den Nährstoffen Phosphor und Kalium. Diese Diskrepanzen sind vor allem auf unzureichende Kalibrierungsmodelle und die Komplexität realer Einsatzbedingungen zurückzuführen. Kommerzielle NIRS-Sensoren, die in Deutschland seit über 15 Jahren im Einsatz sind, ermöglichen eine kontinuierliche Erfassung der Nährstoffkonzentrationen während der Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger. Dadurch wird eine präzisere und ressourcenschonendere Düngung ermöglicht. Allerdings beeinflussen Faktoren wie die Heterogenität der Gülle, Umweltbedingungen (z. B. Temperatur, Vibrationen der Ausbringgeräte) sowie mangelnde Anwenderschulung die Messgenauigkeit erheblich. Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit sind regelmäßige Wartung, optimierte Kalibrierungsmodelle und unabhängige Qualitätskontrollen essenziell. Diese Maßnahmen könnten die NIRS-Technologie zu einem flächendeckend anwendbaren Werkzeug für eine präzisere und nachhaltigere Düngung weiterentwickeln.

Literatur

- [1] Saeys, W.; Watté, R.; Postelmans, A.: The role of NIR spectroscopy in precision fertilisation with manure. International Fertiliser Society Conference, Cambridge, UK, 13. Dezember 2019, IFS Proceedings 840, International Fertiliser Society, York, UK, ISBN 978-0-85310-477-3, S. 1-22.
- [2] DESTATIS: Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben / Landwirtschaftszählung - Fachserie 3 Reihe 2.2.2, 2020, URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/wirtschaftsduenger-2030222209004.pdf?_blob=publicationFile, Zugriff am 02.01.2025.
- [3] Chen, L.; Xing, L.; Han, L.; Yang, Z.: Evaluation of physicochemical models for rapidly estimating pig manure nutrient content. *Biosystems Engineering* 103 (2009), S. 313-320.
- [4] Martínez-Suller, L.; Azzellino, A.; Provolo, G.: Analysis of livestock slurries from farms across Northern Italy: Relationship between indicators and nutrient content. *Biosystems Engineering* 99 (2008), S. 540-552.
- [5] Piepel, M.-F.; Olf, H.-W.: Development of a physicochemical test kit for on-farm measurement of nutrients in liquid organic manures. *Agriculture* 13 (2023), 477.

- [6] Olfs, H.-W.: Improving the use of liquid farm-based manures in arable farming: Case studies from Germany. International Fertiliser Society Conference, Cambridge, UK, 12. Dezember 2024, IFS Proceedings 895, International Fertilizer Society, York, UK. ISBN 978-0-85310-532-9, S. 1-36.
- [7] Piepel, M.-F.; Dittert, K.; Olfs, H.-W.: Evaluation of physicochemical on-farm quick tests for estimating nutrient concentrations in pig slurry and development of an application for mobile devices. *Agronomy* 12 (2022), 2809.
- [8] Chen, L.; Xing, L.; Han, L.: Review of the application of near-infrared spectroscopy technology to determine the chemical composition of animal manure. *Journal of Environmental Quality* 42 (2013), S. 1015-1028.
- [9] van Kessel, J. S.; Thompson, R. B.; Reeves, J. B.: Rapid on-farm analysis of manure nutrients using quick tests. *Journal of Production Agriculture* 12 (1999), S. 115-224.
- [10] van Kessel, J. S.; Reeves, J. B.: On-farm quick tests for estimating nitrogen in dairy manure. *Journal of Dairy Science* 83 (2000), S. 1837-1844.
- [11] Singh, A.; Bicudo, J. R.: Dairy manure nutrient analysis using quick tests. *Environmental Technology* 26 (2005), S. 471-478.
- [12] Schmidt, W.: *Optical Spectroscopy in Chemistry and Life Sciences*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag 2005; ISBN: 3527299114.
- [13] Scotter, C. N. G.: Non-destructive spectroscopic techniques for the measurement of food quality. *Trends in Food Science and Technology* 9 (1997), S. 285-292.
- [14] Horf, M.; Vogel, S.; Drücker, H.; Gebbers, R.; Olfs, H.-W.: Optical spectrometry to determine nutrient concentrations and other physicochemical parameters in liquid organic manures: A review. *Agronomy* 12 (2022), 514.
- [15] Burns, D. A., Ciurczak, E. W. (Hrsg.): *Handbook of near-infrared analysis*. New York (USA): CRC Press 2008, ISBN: 9780429123016.
- [16] Restaino, E. A.; Fernández, E. G.; La Manna, A.; Cozzolino, D.: Prediction of the nutritive value of pasture silage by near infrared spectroscopy (NIRS). *Chilean Journal of Agricultural Research* 69 (2008), S. 560-566.
- [17] Millmier, A.; Lorimor, J.; Hurburgh, C., JR.; Fulhage, C.; Hattey, J.; Zhang, H.: Near-infrared sensing of manure nutrients. *Transactions of the ASAE* 43 (2000), S. 903-908.
- [18] Saeys, W.; Mouazen, A. M.; Ramon, H.: Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Biosystems Engineering* 91 (2005), S. 393-402.
- [19] Cabassi, G.; Cavalli, D.; Fucella, R.; Marino Gallina, P.: Evaluation of four NIR spectrometers in the analysis of cattle slurry. *Biosystems Engineering* 133 (2015), S. 1-13.
- [20] Dagneu, M.; Crowe, T.; Schoenau, J.: Measurement of nutrients in Saskatchewan hog manures using near-infrared spectroscopy. *Canadian Biosystems Engineering* 46 (2004), S. 33-37.

- [21] de Ferrari, G.; Gallina, P. M.; Cabassi, G.; Bechini, L.; Maggiore, T.: Near infrared spectral analysis of cattle slurries from Lombardy (Northern Italy) breeding farms. In: NZNIRSS - The New Zealand Near Infrared Spectroscopy Society (Hrsg.) NIR 2005-NIR in Action. Making a Difference, S. 376-383.
- [22] Sørensen, P., Birkmose, T. S., Hansen, M., Sørensen, L. K.: Rapid analysis of animal slurry by NIR spectroscopy. In: Stenberg, M.; Nilsson, H.; Brynjolfsson, R.; Kapuinen, P.; Morken, J., Søndergaard, B. (Hrsg.): Proceedings from the seminar Manure - An agronomic and environmental challenge, 2005, S. 94-95.
- [23] Mouazen, A. M.; Saeys, W.; Xing, J.; Baerdemaeker, J. de; Ramon, H.: Near infrared spectroscopy for agriculture materials: An instrument comparison. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 13 (2005), S. 87-97.
- [24] Williams, P.; Eising, E.; Malley, D. F.: Industrial-scale continuous on-line analysis of liquid hog manure by NIRS. *NIR News* 31 (2020), S. 25-29.
- [25] Zimmermann, A.; Hartung, E.: Nährstoffgesteuerte Gülleausbringung. Christian-Albrechts-Universität, Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik 2009, S. 1-130.
- [26] Zimmermann, A.; Thiessen, E.; Hartung, E.: Near-infrared spectroscopy (NIRS) for a nutrient based slurry application. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20103074871>, Zugriff am 02.01.2025.
- [27] Stenberg, B.; Gustafsson, K.: On-line measurement of animal and bio slurry quality variations with near infrared spectroscopy. *Precision Agriculture* 13 (2013), S. 337-342.
- [28] Thiessen, E.; Eslamifar, M.; Kock, R.; Hartung, E.: On farm validation of different NIR sensors for manure sensing. *VDI-Berichte* 2406 (2022), S. 9-16.
- [29] Höpker, C.; Dittert, K.; Olfs, H.-W.: On-farm application of near-infrared spectroscopy for the de-termination of nutrients in liquid organic manures: Challenges and opportunities. *Agronomy* (2025) (in der Begutachtung).
- [30] DLG: Test Report 7122 (m-u-t GmbH). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7122.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [31] DLG: Test Report 6886 (John Deere). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/6886.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [32] DLG: Test Report 6887 (John Deere). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/6887.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [33] DLG: Test Report 7281 (John Deere). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7281.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [34] DLG: Test Report 7139 (Dinamica Generale S.p.A.). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/file-storage/7139.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [35] DLG: Test Report 7140 (Dinamica Generale S.p.A.). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/file-storage/7140.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
-

- [36] DLG: Test Report 7235 (Dinamica Generale S.p.A.). URL: <https://pruefberichte.dlg.org/file-storage/7235.pdf>, Zugriff am 02.01.2025.
- [37] Schlagge, B.: Was NIR-Sensoren können. Überzeugt Nahinfrarotspektroskopie in der Düngepraxis? Bauernblatt 22 (2022), S. 8-10.

Autorendaten

Prof. Dr. Hans-Werner Olf s leitet das Fachgebiet Pflanzenernährung und Pflanzenbau der Hochschule Osnabrück.

Charlotte Höpker ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück.

Bibliografische Angaben / Bibliographic Information

Wissenschaftliches Review / Scientific Review

Erfolgreiches Review am 10.03.2025

Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation

Olf s, Hans-Werner; Höpker, Charlotte: Eignung von Nahinfrarotsensoren für die Charakterisierung von flüssigen Wirtschaftsdüngern unter On-Farm-Bedingungen. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2024. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2025. S. 1-13

Zitierfähige URL / Citable URL

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202502071041-1>

Link zum Beitrag / Link to Article

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/eignung-von-nahinfrarotsensoren-fur-die-charakterisierung-von-flussigen-wirtschaftsdungern-unter-on-farm-bedingungen.html>

Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.