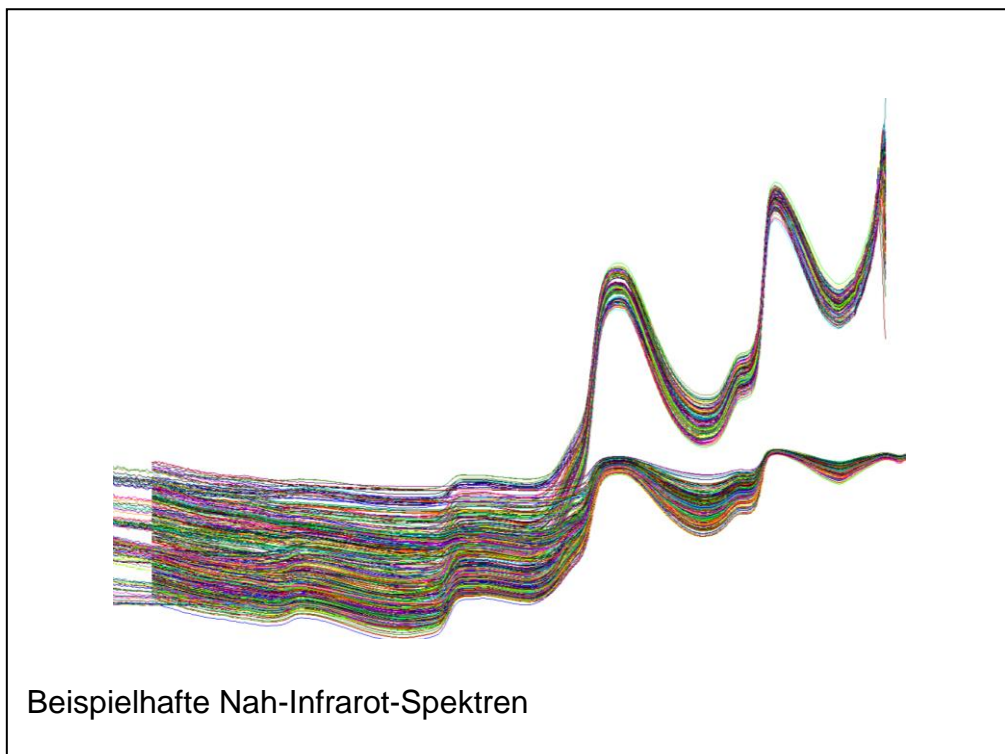


Was kann NIRS in der Landwirtschaft leisten?

Optische Messtechnik zur Bestimmung von
Trockensubstanz und Inhaltsstoffen



Nr. II - 32/2018

Zusammengestellt für die Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung und Logistik) im „Biogas Forum Bayern“ von:



F. Lichti, S. Thurner, G. Henkelmann (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft)



G. Döring (Firma Claas)



C. Alkofer, M. Berndl (Firma Fliegl)



S. Zunhammer, S. Dercks (Firma Zunhammer)

Inhaltsverzeichnis

1. Erklärende Einführung (F. Lichti, S. Thurner - LfL).....	2
1.1 Überblick landwirtschaftliche Anwendungen mit NIRS-Technologie in der Praxis	2
1.2 Licht ins Dunkel durch Molekülschwingungen	2
2. Möglichkeiten und Grenzen der NIRS-Analytik (F. Lichti, S. Thurner, G. Henkelmann - LfL).....	3
2.1 Kalibration.....	4
2.2 Einfluss der Probenahme auf die Qualität von Laboranalysen	4
3. Herstellerkonzepte für NIRS-Analytik bei Ernte, Transport, Dokumentation und für Gülle und Gärrest (alphabetisch sortiert und ohne Anspruch auf Vollständigkeit)	6
3.1 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Claas (G. Döring)	6
3.2 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Fliegl (C. Alkofer, M. Berndl).....	8
3.3 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Zunhammer (S. Zunhammer, S. Dercks).....	11
3.4 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik in Futtermischwagen.....	14
4. Fazit und Ausblick	15
5. Vertiefende Hintergrundinformationen (G. Henkelmann - LfL)	16
Literatur	19

1. Erklärende Einführung (F. Lichti, S. Thurner - LfL)

Die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) ist mittlerweile im landwirtschaftlichen Untersuchungswesen etabliert. Wichtige landwirtschaftliche Inhaltsstoffe wie z.B. TS, Rohprotein, Rohfaser, Rohfett und Stärke, der Pathogenbefall an Futtermitteln oder Ölbestimmung in Raps können inzwischen mit hoher Güte bestimmt werden. Für viele weitere Parameter wird der NIR-Spektroskopie ein hohes Potential zur schnellen, kostengünstigen und hinreichend präzisen Analytik beigemessen. Inzwischen findet die NIR-Spektroskopie auch zunehmend in der landwirtschaftlichen Praxis Einzug. Die Erwartungen sind insbesondere bei der Bestimmung von Qualitätsmerkmalen in Ernteprodukten und Silagen sowie der Inhaltsstoffbestimmung in flüssigen Wirtschaftsdüngern hoch.

1.1 Überblick landwirtschaftliche Anwendungen mit NIRS-Technologie in der Praxis

- Trockensubstanzbestimmung von Silomais und Grünfutter (Feldhäcksler)
- Inhaltsstoffbestimmung (Stärke, Protein, Rohfaser, u. v. m.) von Silomais und Grünfutter (Futtermischwagen)
- Inhaltsstoffbestimmung und -ableitung von Gülle und Gärrest (TS, $\text{NH}_4\text{-N}$, P_2O_5 , K_2O)
- Erntezeitbestimmung von Silomais
- Analyse nach Inhaltsstoffen für die Fütterung (z. B. in der TMR – total mixed ration)

1.2 Licht ins Dunkel durch Molekülschwingungen

Das Spektrum des nahinfraroten Lichts (NIR) erstreckt sich von 800 nm^1 bis 2500 nm im Bereich der Wärmestrahlung. Grundlage der NIR-Spektroskopie ist das Lambert-Beersche Gesetz, das die Abnahme der Strahlungsintensität von Licht durch ein absorbierendes Medium beschreibt. Einfallendes Licht kann von einem Medium (z. B. Maissilage oder Gülle) und seinen einzelnen Inhaltsstoffen adsorbiert, reflektiert oder durchgelassen (transmittiert) werden. Da verschiedene Inhaltsstoffe bei unterschiedlichen Wellenlängen in Schwingung versetzt werden und dabei dem Licht Energie entziehen, kann somit die Inhaltsstoffmengenkonzentration anhand der reflektierten Wellenlängen (Messung der Reflektion, d. h. das Medium wird „von oben“ betrachtet) oder den durchgelassenen Wellenlängen (Messung des durchgelassenen Lichts, d. h. das Medium wird durchleuchtet) bestimmt werden.

NIRS muss „angelernt (kalibriert)“ werden

Da es sich bei der NIR-Spektroskopie jedoch um ein indirektes Messverfahren (Schätzverfahren) handelt, spielt die Kalibrierung der Geräte eine entscheidende Rolle. Für die Kalibrierung wird nach entsprechender statistischer Aufbereitung eine Regressionsgleichung anhand der Kalibrierdaten (Spektren aus Vorversuchen) und den dazugehörigen spezifischen Referenzwerten (Referenzwerte aus konventionellen Laboruntersuchungen) erstellt (Schätzmodell). Eine ausreichende Zahl an repräsentativen Daten mit homogener Verteilung, die den Datenraum möglichst gleichmäßig abdecken, ist dabei zwingend erforderlich. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung landwirtschaftlicher Substrate bzw. flüssiger Wirtschaftsdünger gilt der Kalibrierung ein besonderes Augenmerk. D. h. wiederum, dass es zunächst tau-

¹ Der Nanometer ist eine Längeneinheit. Bezeichnet wird damit die Länge eines Milliardstel Meters. Diese Maßeinheit wird bei der Wellenlänge des Lichts und bei Größenangaben zu Molekülen verwendet.

sende von Messungen braucht, mittels derer das System herstellerseitig „angelernt“ wird. Die Güte und Breite dieser Messungen entscheidet wiederum über die Praxistauglichkeit.

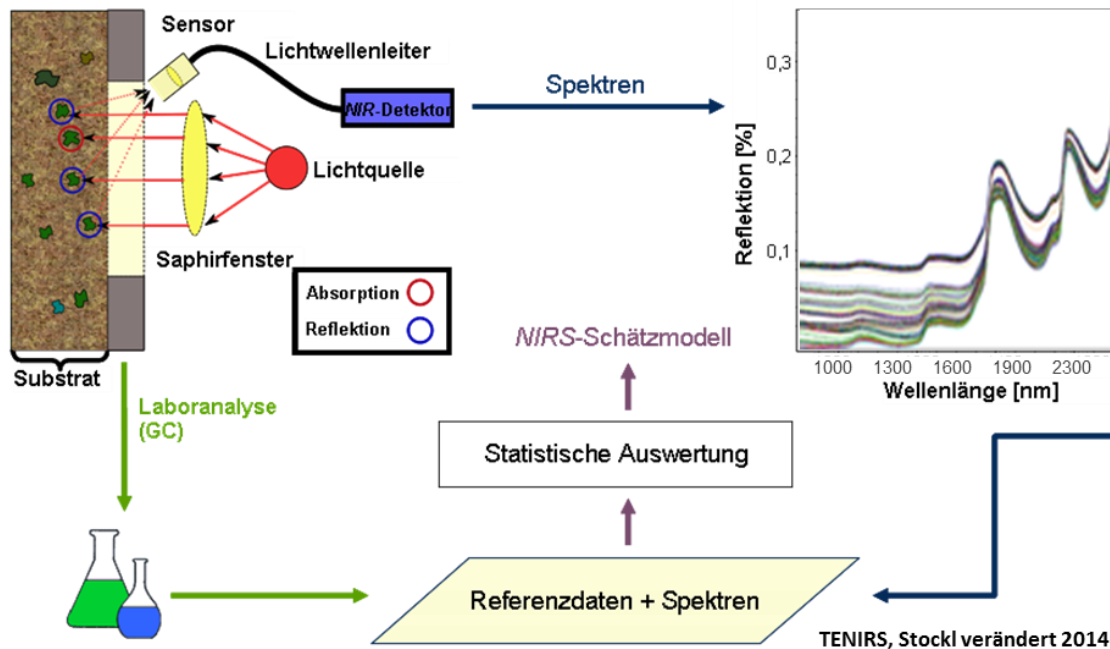


Abbildung 1: Verfahrensablauf zur Entwicklung von Kalibrierungen für die NIR-Spektroskopie nach TENIRS verändert nach Stockl (2017); (Andree, 2009)

2. Möglichkeiten und Grenzen der NIRS-Analytik (F. Lichti, S. Thurner, G. Henkelmann - LfL)

Spektroskopische Schnellverfahren, insbesondere NIRS, haben in den letzten Jahren in vielen Bereichen der Laboranalytik Einzug gehalten. Diese können bei ausreichender Genauigkeit auch in fast allen Bereichen der produzierenden Landwirtschaft zur qualitativen und quantitativen Beurteilung von Ernteproben und der Analyse von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt werden. In der Analytik von Inhaltsstoffen und der Qualitätssicherung im Labor sind daher spektroskopische Verfahren ein unerlässlicher Teil der Agrar-Untersuchungen geworden.

Einfach und schnell analysieren

Ein enormer Vorteil der NIR-Spektroskopie gegenüber anderen analytischen Verfahren ist die deutlich vereinfachte Messpraxis, da eine Probenvorbereitung mittels dieses Verfahrens nicht zwingend notwendig ist. Zudem lassen sich Mehrfachmessungen in hoher zeitlicher Auflösung einfach darstellen, sodass gerade bei sehr heterogenen Medien, wie z. B. flüssigem Wirtschaftsdünger, vielfach wiederholte Messungen schnell und berührungslos vorgenommen werden können. Die Notwendigkeit einer stetigen Modelladaption bei Substrat- bzw. Materialwechsel sollten jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Ansonsten können hohe Schätzgenauigkeiten die Folge sein. Die NIR-Analytik darf daher nicht als „Rundum-sorglos-Paket“ gesehen werden, sondern erfordert ein gewisses Maß an Kenntnis und Aufmerksamkeit seitens des Anwenders. Die Modelladaptionen für z. B. den Jahrgangseffekt [7] leisten i. d. R. die Hersteller der Technik. Der Anwender muss dieses Update je

nach Gerät/Anwendung jedoch selbst installieren oder installieren lassen. Ein Wartungsvertrag mit dem Hersteller, der ein regelmäßiges Update der Kalibration beinhaltet sorgt hier für gleichbleibend gute Ergebnisse und ist daher zu empfehlen.

2.1 Kalibration

Ein großer Vorteil liegt in der simultanen Bestimmung mehrerer Parameter und einer zerstörungsfreien Messung [2]. Dabei hat die NIR-Spektroskopie in modernen Geräten einen hohen Probendurchsatz und kann evtl. sogar vor Ort online zu minutenschneller Routineanalytik verwendet werden. Dadurch bieten sich solche spektroskopischen Verfahren als ein universelles Werkzeug zu Beurteilung von vielen analytischen Problemfällen an, die in der Landwirtschaft nur unzureichend, zu langsam oder zu teuer untersucht werden können. Grenzen liegen vor allem darin, dass für jede zu untersuchende Matrix z. B. Gras, Mais, Gülle..., eine eigene Kalibration erzeugt werden muss. In dieser Kalibration stecken hunderte wenn nicht tausende von Laborwerten, die sorgfältigst bestimmt werden müssen. Proben, die außerhalb einer Kalibration liegen, können nicht gemessen werden. Kalibrationen müssen immer wieder aktualisiert werden (jährliches Update) und die Kalibration muss geprüft werden. Will man Pflanzen auf einer Erntemaschine messen, so sollte das Erntegut immer möglichst gleich geschnitten werden (Häcksellänge). Sehr inhomogene Pflanzenbestände (z. B. Horste von Sauerampfer) verfälschen das Gesamtergebnis.

2.2 Einfluss der Probenahme auf die Qualität von Laboranalysen

Da die Qualität der Untersuchungsergebnisse nicht nur von der eigentlichen Laboranalyse bestimmt wird, sondern auch das Resultat aller vorhergehenden Verfahrensschritte ist, wirken sich die einzelnen Vorstufen der Analyse auf die Gesamtqualität von Analyseergebnissen aus. Die Qualität lässt sich daher nicht an den absoluten Werten und den angegebenen Nachkommastellen im Labor bemessen, sondern an der Repräsentativität der Probe sowie der Genauigkeit, mit der die Proben vorher gezogen und verarbeitet wurden. Dies macht Abbildung 2 deutlich:

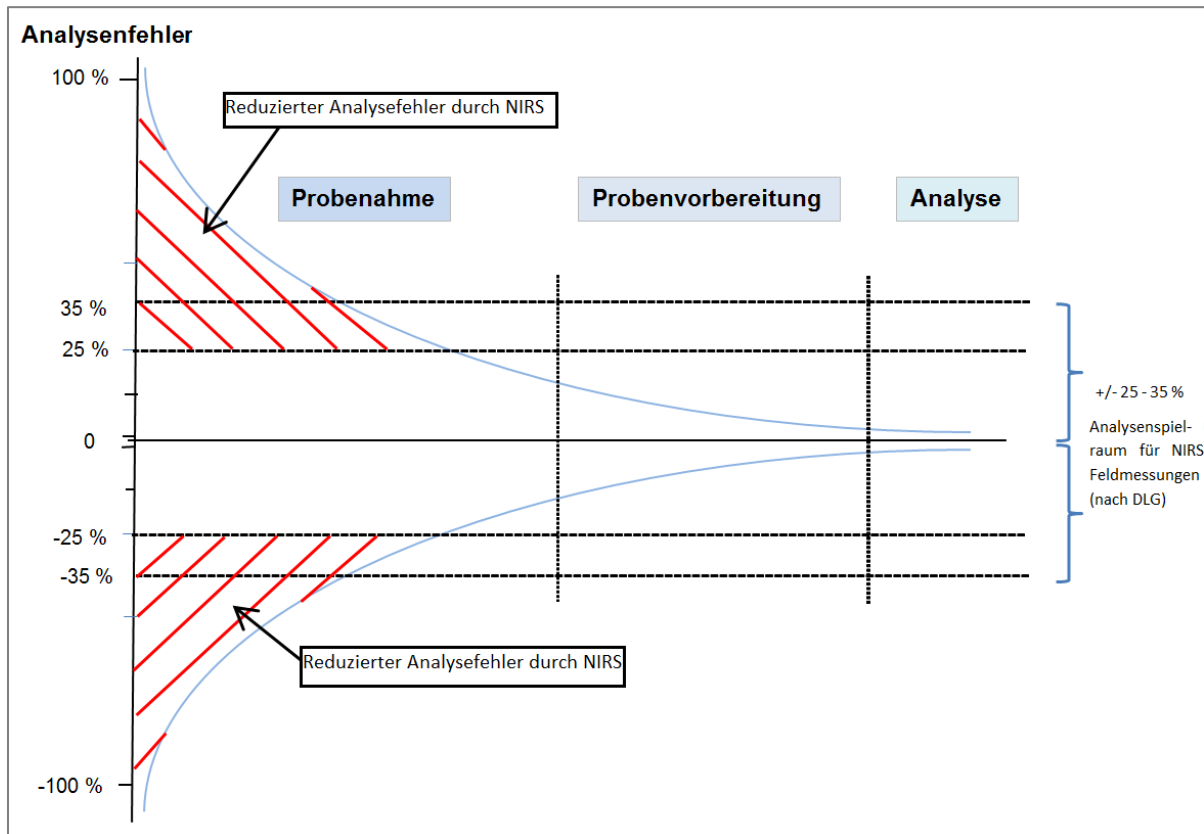


Abbildung 2: Modellhafter, stark vereinfachter Zusammenhang zwischen Analysefehler und Verfahrensschritten bei der NIR-Wirtschaftsdüngeranalytik

Der Hauptanteil der Analysefehler entsteht schon während der Probenahme. Bei der anschließenden Probenvorbereitung, Trocknung, Vermahlung und Homogenisierung der Proben sind Fehler von bis zu 10 % nicht auszuschließen. Nur ein geringer Teil (bis +/-1 %) ergibt sich während der eigentlichen Messung im Labor.

Für eine Online-Anwendung von NIRS ergibt sich somit, dass der Fehler der Messung mangels eines Probenahmefehlers geringer sein sollte als der Fehler mit Probenahme. Die DLG ging daher bei der Beurteilung von NIRS-Feldmessungen in Güllefässern von einem Fehler von etwa 25 - 35 % aus (siehe gestrichelte, waagrechte Linien bei 25 bzw. 35 %). Dieser Fehler ist natürlich höher als ein Messfehler im Labor, doch in Anbetracht der kontinuierlichen Messung auf der Maschine und durch den Wegfall des einzelnen Probenahmefehlers wiederum gering.

Für die Kalibration von NIRS-Systemen und die Referenzanalytik spielt der Probenahmefehler wieder eine extrem wichtige Rolle. Daher sollte für die Kalibrierproben größte Sorgfalt auf die Probenahme gelegt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Proben aus dem Erntegut, aus dem Gülle- und Substratlager, Fermenter, Nachgärer oder Endlager möglichst repräsentativ das vollständige zu beprobende Material widerspiegeln.

Weitere Informationen zur Probenahme unter: http://www.biogas-forum-bayern.de/De/Fachinformationen/Aktuelles/nachhaltig-erneuerbar-energie_Probenahme.html.

Beim nachfolgenden Kapitel 3 handelt es sich um Firmenaussagen.

3. Herstellerkonzepte für NIRS-Analytik bei Ernte, Transport, Dokumentation und für Gülle und Gärrest (alphabetisch sortiert und ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

3.1 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Claas (G. Döring)

Der Feldhäcksler verfügt aufgrund des Gutstromes in der Maschine über zwei Funktionen um Erntegut erfassen zu können.

Primäre Funktion ist die Ertragsmessung (Quantimeter) auf dem Feldhäcksler. Hier wird grundsätzlich der Volumenstrom in der Maschine erfasst. Über den Ausschlag der Vorpresswalzen im Einzugskanal des Häckslers und das Verrechnen der Einzugsgeschwindigkeiten kann das aufgenommene Volumen in der Maschine errechnet werden. Diese erfordert ein regelmäßiges Kalibrieren des Systems. D. h. Kontrollwiegungen über die Waage sind notwendig, um speziell bei Sorten- oder Reifegradwechsel einen Abgleich zum Feldhäcksler zu schaffen. Ändert sich sortenbedingt das Verhältnis von Kolben zu Restpflanze muss dies durch Kalibrationsfahrten wieder abgeglichen werden. Je exakter der Fahrer des Feldhäckslers die Grundeinstellung der Maschinen vornimmt (Ansprechschwelle lernen, 0-Spalt lernen) und entsprechende Kalibrierungen vornimmt, umso exakter arbeitet das System. Dies dient zunächst nur der Erfassung von Erntemengen.



Abbildung 3.: Volumenstrommessung im Feldhäcksler durch Erfassen der Einzugsgeschwindigkeit und Messen der Position der Vorpresswalzen.

DLG Fokustest Prüfbericht Nr. 6168 F

Im zweiten Schritt wird der Trockensubstanzgehalt erfasst. In den Anfängen der TS-Messung wurden Leitwertsensoren verwendet, die einen eingeschränkten Messbereich aufwiesen. Aktuell wird zur TS-Bestimmung die NIR- Spektroskopie verwendet. Im Gutstrom der Maschine misst der NIR-Sensor die Trockensubstanzgehalte durch Erfassen der Reflektionsrate im Wellenlängenbereich von Wassermolekülen. Lichtwellen werden ausgesendet, treffen auf das Häckselgut und werden teilweise reflektiert. Über den Messkopf und ein Hybridkabel werden die Lichtwellen in ein Spektrometer geleitet. Dort erfolgt die Erzeugung der Spektren, die dann auf Basis der hinterlegten Kalibration ausgewertet werden können. Die Trockensubstanzbestimmung erfolgt aktuell zu Silomais, Gras- und Ganzpflanzensilage. Aufgrund häufig inhomogener Bestände bzw. Schwade und der vielen Grasarten im Feld ist die TS-Bestimmung für Grassilage oder Ganzpflanzensilage aktuell ohne Genauigkeitsangaben versehen. Im Silomais wurde die NIRS-Technik durch die DLG mittels Fokus-Test in drei unterschiedlichen TS-Bereichen überprüft. Die Sensorik des Systems misst im Einsatz 20 x

pro Sekunde und erreicht somit eine höhere Genauigkeit. Selbst wenn Schwankungen bei den Messungen auftreten, wird aufgrund der hohen Messfrequenz ein Ergebnis von absolut $\pm 2\%$ TS-Abweichung beim Mais erreicht. Der im DLG Focus Test gemessene Bereich lag zw. 21 – 40% TS, der Sensor selbst deckt jedoch eine Spannweite von 20 – 55 % TS ab.



Abbildung 4: Nah-Infrarot Sensor auf dem Auswurfkrümmer des Feldhäckslers ermittelt durch reflektierende Lichtwellen den Trockensubstanzgehalt und künftig Inhaltsstoffe.

Im Rahmen der Entwicklung gerade für die Inhaltsstoffbestimmung wurde viel Aufwand in die richtige, repräsentative Probennahme zur Kalibrationsentwicklung investiert. Hier ist es sehr wichtig, Entmischungen zu vermeiden, die Proben achtsam zu handhaben und schnell zur Referenzanalyse zu schaffen.

Der Sensor selbst verfügt über eine Erkennung, wenn die Scheibe stark verschmutzt ist und somit nicht mehr sauber messen kann, sowie exakte Einstellmöglichkeiten zur optimalen Ausrichtung der Sensorscheibe in den Gutstrom. Geringfügigen Verschmutzungen mit möglicherweise großen Auswirkungen müssen dennoch durch Wartung und Reinigung vorgebeugt werden. Zudem bekommt der Fahrer eine Meldung, wenn der Mindestdurchsatz unterschritten wird und kein gleichmäßiges Gutpolster zur exakten Messung an der Messstelle anliegt.

In Bezug auf Inhaltsstoffbestimmung werden neben Trockensubstanz folgende Kalibrationen aktuell vorbereitet und abgeprüft: Stärke, Rohfaser, Rohprotein, Rohasche, Rohfett und Zucker. Im Rahmen der Entwicklung ist allerdings auch deutlich geworden, welche hohen Fehlereinflüssen auch die Referenzanalytik (bei der Probenahme fürs Labor) vor allem bei der Inhaltsstoffanalyse im Unterschied zur TM Bestimmung ausgesetzt ist. In der Entwicklung bei CLAAS sind hier technische Lösungen gegeben sowie Absprachen mit dem Referenzlabor getroffen, die den Fehler möglichst geringhalten.

Für den einzelnen Anwender ist demgegenüber der Fehlereinfluss der Referenzanalytik bedeutend höher. So kann es beispielsweise bei der Probennahme bereits zu Entmischungen kommen, die Probe kann nicht repräsentativ gezogen worden sein oder das Handling auf dem Weg zum Labor weist Mängel auf (Kühlung). Zudem mussten wir feststellen, dass auch die Probenvorbereitung im Labor (Trocknen und Vermahlen) durchaus beachtliche Fehlereinflüsse hat. Diese genannten Punkte addieren sich unter Umständen zum eigentlichen Analysefehler hinzu, so dass eine Genauigkeitsangabe bzw. die Definition des wahren Werts in vielen Fällen schwer möglich ist.

Auf dem Thema Stärkeermittlung für Silomais liegt entwicklungsseitig hier der Hauptfokus. Aktuell müssen noch weitere Abgleiche zwischen Laboranalysen (LUFA o. ä.) und der NIRS Technik auf dem Feldhäcksler vorgenommen werden.

Hinweis:

Wie auch bei der Volumenstrommessung und der Trockensubstanz Bestimmung mittels NIRS gilt, dass diese Messsysteme nicht geeicht sind und damit auch nicht für Abrechnungszwecke verwendet werden dürfen.



Abbildung 5: Verrechnung der Daten aus Volumenstrom und Trockensubstanz als Grundlage der Ertragsmessung.

3.2 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Fliegl (C. Alkofer, M. Berndl)

Im Bereich der NIRS-Analytik arbeitet Fliegl mit dem Hause John Deere zusammen. Der NIR-Sensor Harvest Lab 3000 kann sowohl beim Ernteverfahren auf dem Feldhäcksler zum Einsatz kommen, als auch zur Inhaltsstoffbestimmung bei GülLEN und Gärresten. Insgesamt werden bei diesem System 4000 Messungen pro Sekunde durchgeführt. Im Bereich der GülLEN und Gärreste können folgende Parameter analysiert werden: TS-Gehalt, Nt, NH₄, P₂O₅, K₂O. Im Rahmen von DLG-Prüfungen wurden bereits verschiedene Versionen geprüft (u. a. Prüfbericht 6811)

Fliegl bietet die Nährstoffmengenmessung während der Gülleapplikation nur in Kombination mit Durchflussmessung an. Auf der Agritechnica 2017 wurde die NIR-Station „Nutrient Measure Station“ vorgestellt. Gerade in Zeiten mit hohen Mengen an Wirtschaftsdünger und strengeren Vorschriften durch die neue Düngeverordnung werden Nährstoffbörsen zwischen viehintensiven Gebieten und Ackerbauregionen immer notwendiger. Hohe Schlagkraft, eine ausreichende Dokumentation und genaue Ergebnisse sind die wichtigsten Ziele, die nicht nur für den abgebenden sondern auch für den aufnehmenden Betrieb zu verfolgen sind.



Abbildung 6: Nutrient Measure Station

Nähere Beschreibung der „Nutrient Measure Station“

Die Station kann sehr flexibel eingesetzt werden und ist durch verschiedene Aufnahmen wie Dreipunkt, Gerätedreieck, Euroaufnahme und Staplertaschen für den Transport sehr mobil. Das Substrat kann entweder durch die Station gesaugt oder gedrückt werden. Ein Durchflussmesser misst den Volumenstrom mit Hilfe eines magnetischen Induktionsfeldes. Hinter dem Durchflussmesser wird ein so genanntes „Skateboard“ installiert, welches zusammen mit dem NIR-Sensor den Ort der Nährstoffbestimmung darstellt. Optional bietet Fliegl ein Display, bei dem der Durchfluss angezeigt wird. Falls durch die Station gesaugt werden soll, kann dies bequem über einen Andocktrichter erfolgen. Durch die Ecken kommt es sowohl bei Saugen als auch Drücken zu Leistungseinbußen. Die Leistungseinbußen betreffen hier die Saugleistung in Bezug auf die Pumpenleistung. Dies ist für die Bestimmung der Nährstoffmengen allerdings unerheblich da das System in Kombination mit einem Durchflussmesser arbeitet. Der NIR-Sensor muss über den John Deere Vertrieb bezogen werden. Das Programm bei dem die Nährstoffwerte gesammelt und angezeigt werden ist kompatibel mit einem Tablet oder Laptop Microsoft Window® Desktop OS Windows 7 (oder spätere Version). Die Daten werden bequem per W-LAN übertragen und können auch ausgedruckt werden.

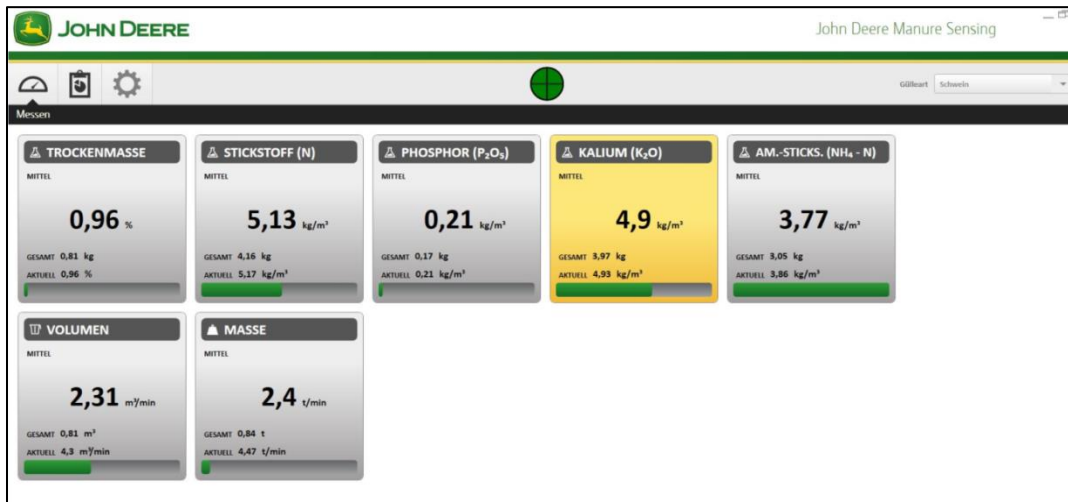


Abbildung 7: Auswertsoftware der NMS

Die Messungen starten und stoppen automatisch anhand des erkannten Durchflusses. Alle Protokolle werden in einer Historie mit Filterfunktion gespeichert. In der Kurzübersicht der Messberichte werden die Nährstoffe und das Gesamtvolumen zum zugehörigen Kunden dargestellt.

Aus dieser Historie lassen sich die jeweiligen Protokolle zu PDF Files konvertieren um sie problemlos ausdrucken zu können. Im PDF File sind Daten wie Aufnehmer, Übertragungsfahrzeug, Abgeber, Fahrzeugdetails, Gesamtmasse, Gesamtvolumen, Mittelwert der Inhaltsstoffe und Gesamtwert der Inhaltsstoffe enthalten. Dies ermöglicht das betriebsinterne Controlling.

Als weiteres System bietet die Fliegl Agrartechnik GmbH das MCS System an. Bei diesem ist der NIR Sensor direkt am Ausbringfahrzeug verbaut und bestimmt die Nährstoffe direkt bei der Ausbringung.



Dem System können Ziel- und Grenzwerte unterschiedlicher Nährstoffe bekanntgegeben werden. Aus diesen benutzerdefinierten Einstellungen werden Zielgeschwindigkeiten zu jedem Zeitpunkt neu berechnet.

In Kombination mit der Fliegl Flow Control Anwendung und einem John Deere Traktor wird ein automatisches nährstoffgesteuertes Ausbringen ermöglicht (TIM). Ist weiterhin ein GPS System am Traktor verbaut, können die aktuell ausgebrachten Nährstoffe in einer Applikationskarte gespeichert werden. Diese Karten können beispielsweise in Düngerstreuern eingelesen werden um Nährstoffe bedarfsgerecht auszugleichen. Das System bildet somit einen Baustein im Precision Farming Ansatz.

Falls sich kein John Deere Traktor im Einsatz befindet, werden Geschwindigkeitsvorschläge an den Fahrer übermittelt. Mit Hilfe von GPS können auch hier die Nährstoffdaten in Applikationskarten gespeichert werden.

3.3 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik bei Zunhammer (S. Zunhammer, S. Dercks)

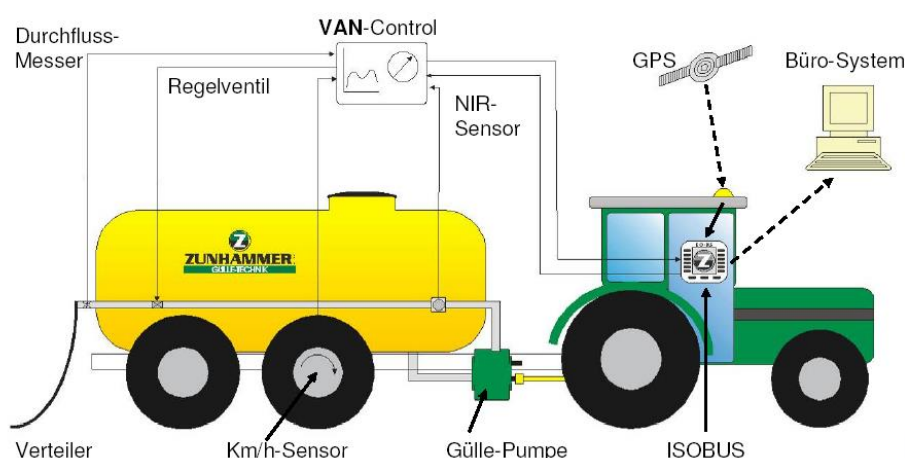


Abbildung 8: Schematische Darstellung von VAN-Control

In der Gülleausbringung ist eines der größten Probleme das Informationsdefizit zum Zeitpunkt der Ausbringung. Die Nährstoffverteilung in den Güllebehältern ist sehr heterogen und kann bedingt durch die Größe der Behälter auch oft schlecht homogenisiert werden. Eine für die Nährstoffanalyse notwendige Probe wird meist zum Zeitpunkt der Ausbringung gezogen und benötigt anschließend mehrere Wochen bis die von Labors ermittelten Nährstoffangaben dem Landwirt bekannt werden. Abgesehen davon bildet eine einzige Probe oftmals nicht die komplette Nährstoffverteilung im Güllebehälter ab. Zusätzlich verschärft wird diese Situation durch deutlich strengere Dokumentationspflichten, die durch die seit Juni 2017 gültige Düngeverordnung in Kraft getreten sind.

Aus diesen Gründen beschäftigt sich Zunhammer bereits seit 2003 mit der Möglichkeit, Nährstoffgehalte in Wirtschaftsdüngern (Gülle) zu bestimmen. Nach einigen Jahren der Entwicklung wurde für das erste funktionsfähige System „VAN-Control“ auf der AGRITECHNICA 2007 die Silbermedaille verliehen. Damals noch mit getrennten NIRS-Komponenten „Messkopf“, „Spektrometer-Einheit“ und „Vorhersageeinheit“.

Seitdem hat die Fa. Zunhammer die Technologie weiterentwickelt und bietet seit 2015 VAN-Control 2.0 an. Dieses integriert die für NIRS notwendigen Baugruppen in einer einzigen physikalischen Komponente und ist gleichzeitig ein vollwertiger ISOBUS-Jobrechner. Die für ein modernes Güllefass notwendige ISOBUS-Steuerung kommuniziert so direkt mit dem

NIRS-Sensor. Die Aufbereitung der Daten geschieht im ISOBUS-Terminal in der Menüführung der Güllefass-Steuerung.

Für die Ausbringung interessante Komponenten der Gülle sind:

- Gesamtstickstoff (Nges)
- Ammonium (NH₄)
- Phosphat (P₂O₅)
- Kali (K₂O)
- Trockensubstanz

All diese Werte können von VAN-Control 2.0 kontinuierlich abgeleitet, geschätzt und für die Ausbringung der Gülle verwendet werden.

Kalibriert ist VAN-Control 2.0 für Rinder- und Schweine und Biogasgärrest. Dabei ist zu beachten, dass es derzeit eine einzige Kalibrierung für alle kalibrierten Güllearten gibt. Diese kann vom Bediener weder umgestellt noch modifiziert werden. Durch die hohe 4-stellige Probenbasis werden inzwischen verhältnismäßig gute Genauigkeiten erzielt. Das kann durch die im November 2017 erhaltene DLG-Anerkennung (Prüfbericht #6801) bestätigt werden.

Der einleitend angesprochene „Jahreseffekt“ kann durchaus beobachtet werden, obwohl die Genauigkeiten innerhalb eines Jahres stabil bleiben. Spürbare Effekte für das Medium Gülle sind mittelfristig im Zeitraum von 3-5 Jahren zu erwarten. Solange sich das Medium nicht durch Veränderungen der Lagerung, Tierhaltung, eventuellen Zusätzen oder anderen Effekten verändert kann eine funktionierende Kalibrierung mehrere Jahre eingesetzt werden.

Die ebenfalls bereits angesprochene Herausforderung durch verschmutzte Messfenster trifft bei der Ausbringung von Wirtschaftsdünger nur zu bestimmten Zeitpunkten zu. Als kritisch sind hier eigentlich nur die Messungen anzusehen, die direkt nach der Wiederinbetriebnahme nach längeren Standzeiten stattfinden. Beim Befüllvorgang entstehen für Flüssigkeiten recht hohe Strömungsgeschwindigkeiten bis über 5 m/s. Diese sorgen dafür, dass das Messfenster innerhalb von Sekunden von anhaftenden Faserrückständen befreit wird. Die durchgeführte Messung liefert also trotzdem gute Ergebnisse.

Eine größere Herausforderung stellt die Anpassung der Kalibrierung an schwankende Temperaturen dar. Gülle wird speziell im Frühjahr oft bei Temperaturen um den Gefrierpunkt (teilweise auch darunter) ausgebracht. Um NIRS für diesen Einsatzbereich überhaupt nutzen zu können, wurde VAN-Control 2.0 mit einer Heizung ausgestattet. Dadurch ist es möglich, bei Außentemperaturen bis -10° Messungen durchzuführen. Die Kalibrierung ist darauf abgestimmt und entsprechend belastbar. Für VAN-Control 2.0 gilt ein Arbeitstemperaturbereich von -5°C bis +50°C.



Abbildung 9: Messwert-Übersicht



Abbildung 10: Ausbring-Menü

Das Zusammenspiel zwischen den beiden ISOBUS-Geräten „VAN-Control 2.0“ und Gülle-fass-Steuerung“ ist bei Zunhammer wie folgt realisiert:

- Messungen werden beim Befüllvorgang durchgeführt und in der Güllefass-Steuerung gemittelt.
- Diese Mittelwerte werden beim Ausbringvorgang als Regelgröße benutzt.
- Als Regelgrößen können je nach Bedarf verschiedene Messwerte eingestellt werden.

Die Homogenität der Nährstoffe im Güllefass bleibt nach dem Befüllvorgang auch ohne Rührvorrichtung einige Zeit erhalten. Falls nach der Befüllung längere Transportfahrten zum Feld stattfinden empfehlen wir die Installation einer Rührvorrichtung. Diese Empfehlung gilt unabhängig davon ob VAN-Control 2.0 verbaut wird oder nicht.

Mit VAN-Control 2.0 ermittelte Werte können mit dem ISOBUS Task-Controller im Terminal aufgezeichnet werden. Auf der Basis von Durchflussmessern oder ähnlichen Messgeräten ermittelte Flüssigkeitsmengen werden mit den Nährstoffgehalten verrechnet und entsprechend aufsummiert. Falls im ISOBUS-System ein GPS-Empfänger installiert ist werden beim Ausbringvorgang auch die dosierten Mengen dokumentiert.

Eine recht neue Möglichkeit der Aufzeichnung bieten Telemetriesysteme. Diese entlasten die Bediener der Geräte stark und sorgen für eine durchgehend nachvollziehbare Dokumentation der geleisteten Arbeit.

Es hat sich gezeigt, dass VAN-Control 2.0 auch recht problemlos an Fahrzeuge anderer Hersteller angebaut werden kann. Zunhammer hat inzwischen Erfahrung mit der Nachrüstung von VAN-Control 2.0 an Selbstfahrern, Güllefässern und Verschlauchungsanlagen von verschiedenen Herstellern. Es wurden sogar ältere Fahrzeuge, die bisher keine Elektronik aufgebaut hatten, mit NIRS aufgerüstet.

Durch die Verfügbarkeit der NIRS-Technologie für Wirtschaftsdünger werden alte Prozesse auf neue Wege gebracht:

- Gülletransporte könnten mit zutreffenden Lieferscheinen versorgt werden (derzeit nach Fachrecht nicht gültig).
- Biogasanlagen können erstmals quantifizieren, welche Nährstoffe von wem angeliefert – und auch abgeholt werden.
- Nährstoffbedarfssensoren können durch Kombination mit NIRS beim Gülleausbringen den Nährstoffbedarf pflanzengerecht decken.
- Güllebehälter könnten heterogen entleert werden:
 - o nährstoffarme Flüssigkeiten (Schwimmschicht) können in hohen Dosierungen auf arrondierten Flächen,
 - o nährstoffreiche Flüssigkeiten (Sinkenschicht) weiter transportiert und in geringen Dosierungen auf große Schläge verteilt werden



Abbildung 11: Die Königsklasse: Nährstoffbedarfssensor kombiniert mit Nährstoffsensor

3.4 Angebote und Möglichkeiten der NIRS-Analytik in Futtermischwagen

Weitere Einsatzgebiete zur bedarfsgerechten Zuteilung von TMR und zum innerbetrieblichen Controlling sind in der Entwicklung. Teilweise können über Firmen wie Silo-King, Faresin u. a. Hersteller diese schon betrieblich genutzt werden. In einer weiteren Auflage dieser Fachinformation werden diese Konzepte mit aufgenommen.

4. Fazit und Ausblick

- NIRS bietet das Potential, gezielter mit vorhandenen Ressourcen (Nährstoffe, Futtermittel, usw.) umzugehen und für die pflanzenbauliche Bestandsführung und Tierfütterung zu nutzen.
- NIRS eröffnet die Möglichkeit, den Wert der eigenen Nährstoffe direkt zu sehen und monetär zu bewerten (nur zum betriebsinternen Controlling, da nicht eichfähig).
- Um flüssige Wirtschaftsdünger hinsichtlich deren Nähr- und Inhaltsstoffe bedarfsgerecht zu applizieren, wird zum NIRS eine Volumen- oder Massenerfassung benötigt.
- NIRS-Schätzungen sind betriebsindividuell und online verfügbar.
- Durch die Vielzahl der Schätzungen mit NIRS wird der Probennahmefehler reduziert (siehe auch: [„Waagen und andere Messgeräte zur Grünguterfassung in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion und Tierhaltung“](#)).

Hersteller und Anwender versprechen sich zukünftig ein großes Potential der NIRS-Technologie in der Landwirtschaft. Derzeit ist unklar inwieweit das Verfahren im Rahmen des gültigen Fachrechts Laboranalysen ersetzen kann.

Vor- und Nachteile der NIRS-Technologie für den Landwirt

Vorteile	Nachteile
+ Ergebnisse liegen sofort vor (bedarfsgerecht)	- Fachwissen nötig (Plausibilisierung)
+ Vielzahl von Inhaltsstoffen für internes Betriebsmanagement ermittelbar	- Hohe Ungenauigkeit sobald außerhalb der Kalibrierung
+ Geeignet für eine Vielzahl von Medien (flüssig, fest)	- Eichzulassung nicht gegeben (Schätzwerte statt Messwerte)
+ Hoher Probendurchsatz	- Hohe Investitionskosten
+ Reduzierter Probennahmefehler bei automatischer Messung im Gutstrom	- Regelmäßige herstellerseitige Updates
+ Vereinfachte Dokumentation (optional)	- Eine bundeseinheitliche, fachliche Anerkennung ist derzeit nicht gegeben
+ Schätzung von Nährstoffveränderungen im (abgesetzten) Güllebehälter (z.B. Dickgülle, natürliche Sedimentation)	

5. Vertiefende Hintergrundinformationen (G. Henkelmann - LfL)

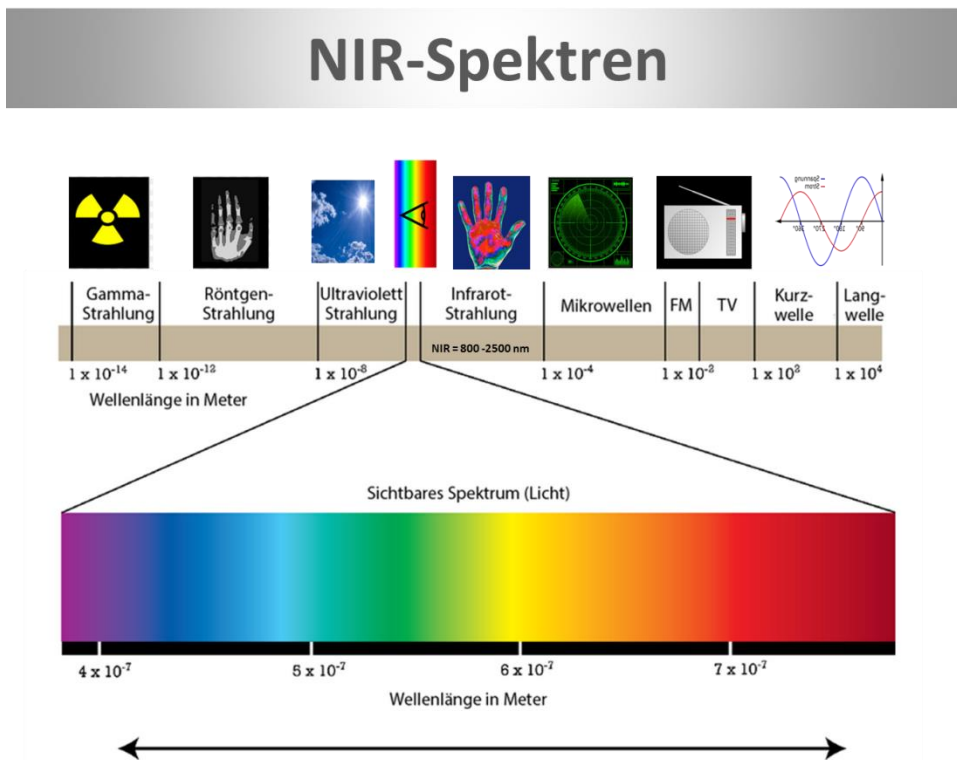


Abbildung 12: NIR-Spektren (Quelle: Firma Thermoglass)

Die NIRS-Methodik hat entsprechend der Beschränkung auf die Wellenlängen zwischen 780 nm bis 2500 nm vor allem die Fähigkeit organische Verbindungen anzuregen. Vorwiegend werden mit der NIR-Spektroskopie Absorptionsbanden von Ober- und Kombinationsschwingungen gemessen, an denen neben Wasserstoff ein schweres Atom beteiligt ist. Diese Moleküle müssen in der Lage sein einen Dipol zu bilden, wie zum Beispiel C-H, O-H und N-H. Gleiche Moleküle schwingen in für sich charakteristischen Frequenzen. In der folgenden Tabelle werden die typischen Schwingungen im NIR-Bereich dargestellt:

Tabelle 2: Einige typische Schwingungen des NIR-Bereiches; Quelle: [1]

Wellenlänge [nm]	Schwingungstyp	
2400 – 2250	C-H	Kombination
2150 – 1850	O-H, N-H	Kombination
1800 – 1600	C-H	1. Oberschwingung
1600 – 1450	O-H, N-H	1. Oberschwingung
1400 – 1350	C-H	Kombination
1250 - 1150	C-H	2. Oberschwingung

Da jedoch bei der Untersuchung im Agrarbereich meist keine reinen Substanzen wie z. B. Aspirin-Tabletten gemessen werden, sondern ganze Pflanzen mit tausenden von Inhaltsstoffen, von denen 90 Prozent unbekannt sind, sind hier die Grenzen dieser Technik im Untersuchungswesen vorgegeben. Nicht alles lässt sich mit hinreichender Genauigkeit im Labor und damit auch nicht mit NIRS bestimmen. Die Grenzen dieser optischen Methode liegen in der Spurenanalytik. Stoffkonzentrationen unter 0,1 % können nur unter bestimmten Bedingungen und nur im Labor gemessen werden [4]. Die NIRS-Technik ist ein optisches Verfahren. Sie gehorcht dem Lambert Beerschen Gesetz. Darin ist enthalten die Schichtdicke der Probe bzw. die Eindringtiefe in das Material. Variiert der Abstand oder die Packungsdichte vor der Optik sind die Resultate unterschiedlich. Insbesondere bei stark gefärbten oder dunklen Flüssigkeiten mit hohem Feststoffanteil, wie z. B. bei Gülle und Gärresten sind hier physikalische und optische Grenzen gesetzt [5].

Für Pflanzenmaterial ist es von entscheidender Bedeutung, dass die hinterlegte Laboranalytik für die Kalibration möglichst exakt und qualitativ sehr hochwertig für das Ziel der Kalibration ist. Eine schlechte Laboranalytik bringt auch schlechte NIRS-Schätzwerte hervor.

Eine Kalibration ist immer nur für eine Matrix, also für eine Pflanzen- oder Getreideart gültig. Alle Proben einer Kalibration (etwa 20% der Proben) aber mindestens etwa 100 bis 200 oder mehr sollten aus der gleichen Grundgesamtheit einer Probenserie stammen und die ganze Variabilität der Proben für einen bestimmten Messparameter repräsentieren. So ist bei Gras-NIRS die Gesamtheit aller Schnitte, der Schnittzeitpunkt und Klima- und Anbaubedingungen zu berücksichtigen. Statistisch ist die Kalibrierung immer nur auf die Proben beschränkt, aus denen die Kalibrierproben bestimmt wurden.

Sehr wichtig für alle NIR-Schätzungen ist die Homogenität der Proben. Daher ist im Labor eine einheitliche Probenaufbereitung notwendig. Die typische Probenaufbereitung für landwirtschaftliche Produkte besteht aus einer Trocknung bei 60 °C bis zur Lagerfähigkeit und einer Vermahlung mit einem 1 mm Sieb. Bei der Erstellung von Kalibrationen ist darauf zu achten, dass diese einheitliche Probenaufbereitung auch bei allen unbekanntem Proben eingehalten wird. Dabei dürfen sich beim Trocknen des Mahlgutes keine Verfärbungen ergeben, denn zu stark getrocknete Proben können mit der Kalibration nicht mehr berechnet werden. Bei Frischproben ist für viele Kalibrationen und Ergebnisse die Partikelgröße eine entscheidende Einflussgröße. Je grober das Probenmaterial, desto inhomogener und desto schlechter ist die NIRS-Schätzung. Inhomogenitäten in der Matrix, wie Sie z. B. bei Weide- und Wiesenbewuchs durch unterschiedliche Pflanzen wie z. B. Weidelgras, Seggen oder Sauerampfer auftreten, setzen die Genauigkeit von NIR-Schätzungen, wegen der unterschiedlichen Inhaltsstoffkonzentrationen, deutlich herab. Bei stark wasserhaltigen Proben kann das Wassersignal bei 1930 nm andere Schwingungen überlagern und die Auswertung verhindern. Zudem ist die Probentemperatur immer konstant und gleich zur Kalibration zu halten, weil Änderungen in der Temperatur auch die Lage der Wasserbande verändern kann.

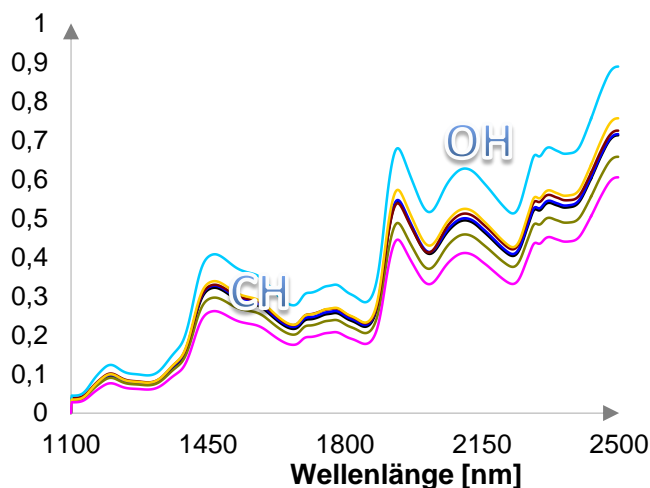


Abbildung 4: NIR-Spektren von Gräserproben (Wasserpeak bei 1900 nm, „OH-Schwingung“)

Keine Kalibration ist ewig gültig. Bei allen landwirtschaftlichen Produkten, die saisonal erzeugt werden gibt es einen sog. "Jahrgangseffekt" [7]. Um diesen zu umgehen muss jedes Jahr ein Update der vorhandenen Kalibration oder eine neue Kalibration erzeugt werden. Dazu muss jedes Jahr und für jede Matrix aus der neuen Ernte eine bestimmte Menge aktueller Proben ausgewählt, im Labor mit Referenzmethoden untersucht und die Kalibration auf Grund dieser Laborwerte neu angepasst werden.

Hat man alle diese Voraussetzungen für eine gute Kalibration erfüllt, ist es durchaus möglich, eine Online-Schätzung von bestimmten Parametern auch schon auf einer Erntemaschine oder bei Applikationstechnik unterzubringen. Dabei sind jedoch der Verschmutzungsgrad des Messfensters und die Erschütterungen der Optik sowie die Homogenität der Proben zu berücksichtigen. Maisblätter und Stängel, Körner, Spindel und Lieschen haben unterschiedliche NIRS-Signale. Daher ist der Erntezeitpunkt und Reifegrad sowie die Zusammensetzung des Mais-Häckselgutes von großer Bedeutung für die Ergebnisse.

Da der NIR-Messstrahl nur ein bis zwei mm in die Probenmatrix eindringen kann und die Reflexion ungehindert auf die Messzelle gelangen muss, ist es entscheidend, was am Messfenster gemessen wird.

Bei allen Online-Anwendungen der NIRS-Technik muss jedoch berücksichtigt werden, dass Landwirte, die Anwender der neuen Technik, in der landwirtschaftlichen Praxis weitestgehend analytisch nicht erfahren sind und Schulungen im Umgang mit der Technik und der Interpretation der Ergebnisse unbedingt erforderlich sind. Bei Anerkennung der Ergebnisse entsprechend gesetzlicher Vorgaben, muss zwingend und turnusmäßig eine hoheitliche Validierung oder Notifizierung der Geräte erfolgen.

Dann aber sind schnell verfügbare Ergebnisse z. B. beim Wassergehalt für die Bestimmung des Trockenmasseertrags und Nährstoffe in der Gülletechnik möglich und von großem Vorteil. Die Wartezeiten für Laboranalysen fallen weg und oft reicht schon ein Schätzwert, wie z. B. dem Trockensubstanz- oder N-Gehalt im Bereich von 25 % Genauigkeit aus um eine Einschätzung der Ernte für die Nahrungs- oder Futtermittelerzeugung [3], als Berechnungsgrundlage für das betriebsinterne Controlling oder die Qualität der Nutzung in Biogasanlagen zu ermitteln. Sinnvoll wäre zukünftig neben dem Wassergehalt z. B. auch ein NIRS-Faktor für die Gesamtenergie der Ernte, der umfassend Auskunft über die Nutzungsqualität geben könnte.

Literatur

- [1] FRANK, H. (2005): Wikimedia Commons, lizenziert unter GNU-Lizenz für freie Dokumentation.
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_sRGB.svg?uselang=de
- [2] STOCKL, A., Lichti, F., 2017: Near-infrared spectroscopy (NIRS) for a real time monitoring of the biogas process, In Bioresource Technology, 2017, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.173>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417317388>)
- [3] STOCKL, A., Lichti, F., 2017: Nahinfrarot Spektroskopie (NIRS) als Monitoringtool für den Biogasprozess. Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft, Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2017, 145-148.
- [4] Gummeny, A., (2007): Rheo-optische Fourier-Transform-Nahinfrarotspektroskopie von Poly(dimethylsiloxanen), Dissertation an der Universität Duisburg-Essen
- [5] Henkelmann, G., Höck, S., (2014): „Weiterentwicklung spektroskopischer Schnellverfahren zum Nachweis von Kleberproteinen bei Weizenkorn und –mehl“, https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/zentrale_analytik/dateien/backqualitaet-kleber.pdf
- [6] Henkelmann, G. (2014): „Nahinfrarotspektroskopie, ein Instrument zur quantitativen und qualitativen Bestimmung von Mykotoxinen im Weizen“, https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/zentrale_analytik/dateien/backqualitaet-mykotoxine.pdf
- [7] Muscheler W., (1999): „Zerstörungsfreie Analyse von Lebensmitteln mit NIR und Perten Dioden Array“, Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Qualitätsforschung 34. Tagung, ISBN: 3-9805230-3-9
- [8] Stockl, A., Lichti, F., (2017): an der LfL Freising: „Nah-Infrarot Spektroskopie (NIRS) als Monitoringtool für den Biogasprozess“, Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik (Bonn), S.145-148
- [9] „NIRS Untersuchung zur Erfassung futterrelevanter Qualitätsparameter von Silomaissorten in einem Gerätenetzwerk“ Tagungsband der Landbauforschung Völkerode, Sonderheft 163, ISSN: 0376-0723

Zitiervorlage:

Lichti, F., Thurner, S., Henkelmann, G., Döring, G., Alkofer, C., Berndl, M., Zunhammer, S., Dercks, S. (2018): Was kann NIRS in der Landwirtschaft leisten? In: Biogas Forum Bayern Nr. II - 32/2018, Hrsg. ALB Bayern e.V., **[Link]**, Stand **[Abrufdatum]**.

Das „Biogas Forum Bayern“ ist eine Informationsplattform zum Wissenstransfer für die landwirtschaftliche Biogasproduktion in Bayern.

Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung)

hier erarbeiten Experten Fachinformationen zu folgenden Themen:

- Logistik der Ernte
- Gärrestausbringung
- Konservierung und Silagequalität

Mitglieder der Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung)

- **Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Amberg, Erding, Ingolstadt, Neumarkt i.d. Oberpfalz, Nördlingen Pfaffenhofen a. d. Ilm und Uffenheim**
- **Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten**
- **Bayerisches Landesamt für Umwelt**
- **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft**
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft
Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik
- **Biogasanlagenbetreiber**
- **Böck Silosysteme GmbH**
- **CLAAS**
- **Fachverband Biogas e.V.**
- **Kuratorium Bayerischer Maschinen- und Betriebshilfsringe e.V.**
- **KWS SAAT SE**
- **Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern (LKV) e.V.**
- **Landmaschinenschule Landsberg am Lech, Landshut**
- **Landwirtschaftliche Lehranstalten des Bezirkes Oberfranken**
- **Regens Wagner Hohenwart**
- **Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing**
- **UDI Bioenergie GmbH**



Herausgeber:

Arbeitsgemeinschaft Landtechnik
und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
Vöttinger Straße 36
85354 Freising
Telefon: 08161/71-3460
Telefax: 08161/71-5307
Internet: <http://www.biogas-forum-bayern.de>
E-Mail: info@biogas-forum-bayern.de