

Messung von Feuchtigkeitsvariationen bei Pflanzenblättern am Beispiel von Brokkoli auf Basis eines NIR Hyperspectral Imaging Systems

Marius Thiel¹, Thomas Rath², Arno Ruckelshausen¹

¹ Hochschule Osnabrück/ Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, Deutschland

² Leibniz Universität Hannover/ Institut für Biotechnologie, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Deutschland

Email: ma.thiel@hs-osnabrueck.de, rath@bgt.uni-hannover.de, a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Die Analyse von spektralen Reflexionsdaten bietet die Möglichkeit, Pflanzeigenschaften zerstörungsfrei zu bestimmen. Im Gegensatz zu Standard-Mini-Spektrometern können beim Spectral Imaging Verfahren die Spektralinformationen auf einzelnen Pflanzenstrukturen räumlich aufgelöst werden. Dieses ermöglicht, die Spektraldaten speziell ausgewählter Strukturen für Analysen zu verwenden, indem diese entsprechend der Anforderung vorselektiert werden können. Die Technologie des NIR Hyperspectral Imaging wird in dieser Untersuchung für Feuchtigkeitsanalysen von Brokkoli-Pflanzen eingesetzt. Auf Basis der Reflexionsdaten wird mittels statistischer Verfahren ein Algorithmus zur Unterscheidung von Pflanze und Boden entwickelt. Unter Verwendung von Wasserabsorptionsbanden im NIR-Bereich wird ein Wasserindex (WI) eingeführt und durch bildgebende spektrale Reflexionsmessungen mit der Feuchtigkeit von Einzelblättern korreliert und analysiert.

Deskriptoren: Bildgebende NIR Spektralanalyse, Wasserindex, Feuchtigkeit, Einzelpflanze

Abstract: *The analysis of spectral reflectance data gives the opportunity for non-destructive measurement of plant conditions. In contrast to usual miniature spectrometers the technology of spectral imaging allows to get spectral information of single plant structures in reference to spatial resolution. Therefore special structures for analyzes can be pre-selected by observing the requirements to the reflectance signature. In this study the technology of NIR spectral imaging applied to analyze moisture of broccoli plants. Based on reflectance data an algorithm for determination of plant and soil is developed by using a statistical method. A water index (WI) was established, consisting of a ratio calculated by a water absorbance band in the near infrared. The accuracy of the water index has been analyzed using a correlation to the moisture of single leaves.*

Keywords: NIR hyperspectral imaging, water index, moisture, single plant

1 Einleitung

Die Erfassung von Pflanzenparametern hat eine hohe Bedeutung in der Landwirtschaft zur Verbesserung der Produktivität sowohl bei der Pflanzenproduktion als auch im besonderen Maße bei der Züchtung neuer Sorten im Pflanzenversuchswesen. Eine berührungslose und zerstörungsfreie Methode ermöglicht zudem, einen Pflanzenbestand über einen beliebig langen Zeitraum zu analysieren, um Änderungsverläufe z.B. im Rahmen sensorgestützter Bonituren aufzuzeigen (RUCKELSHAUSEN *et al.* 2009).

Die Spektralanalyse bietet die Möglichkeit, mittels Reflexionsmessung Pflanzenparameter zerstörungsfrei zu bestimmen, da die in den Pflanzen eingelagerten Pigmente und chemischen Verbindungen einzelne Bereiche der einfallenden elektromagnetischen Strahlung absorbieren (WU *et al.* 2009). Durch immer leistungsfähigere bildgebende Spektrometer sind kleine Messobjekte, wie z.B. Einzelblätter von Pflanzen, neben dem VIS- auch im NIR-Band in einer ausreichenden spektralen und räumlichen Auflösung erfassbar (THIEL *et al.* 2010). Durch die Analyse des von der Pflanze reflektierten Wellenlängen-Spektrums lassen sich Kenntnisse über Pflanzeninhaltsstoffe, z.B. Blattpigmente, Stickstoff und Wasser, erzielen und damit Aussagen über den Pflanzenzustand treffen (GROELL *et al.* 2006, HELLEBRAND *et al.* 2005, LARSOLE 2007).

Werden für die Analysen 1-Kanal Spektrosensoren verwendet, können nur homogene Messproben mit hoher Genauigkeit betrachtet werden. Bei inhomogenen Proben überlagern sich im Detektor die im Winkel der numerischen Apertur einfallenden Spektren und können nicht getrennt behandelt werden. Durch die integrative Messung gehen daher Detailinformationen verloren (**Bild 1** oben).

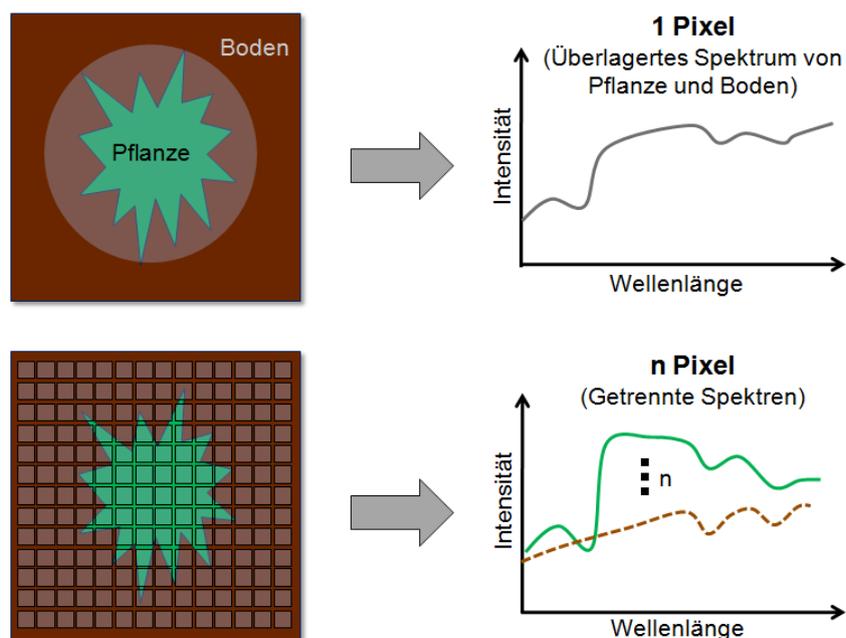


Bild 1: Spektralmessung mit einem 1-Kanal-Mini-Spektrometer (oben); Spektralmessung mit bildgebendem Spektrometer (unten)

Bei Verwendung von abbildenden Spektrosensoren, s.g. Spectral Imaging Systemen, können detailliertere Informationen bei inhomogenen Messproben gewonnen werden (SMOLYAR 2003). Für jedes einzelne Pixel des messenden Systems wird ein vollständiges Spektrum im sensitiven Wellenlängenbereich gewonnen (**Bild 1** unten). Diese Spektralinformationen können mit bekannten Algorithmen der Bildverarbeitung vorverarbeitet werden. Durch geeignete Analysen lassen sich bestimmte Bereiche vorfiltern, so dass z.B. nur Pixel mit Spektralcharakteristiken von Pflanzen für die weiteren Auswertungen selektiert werden.

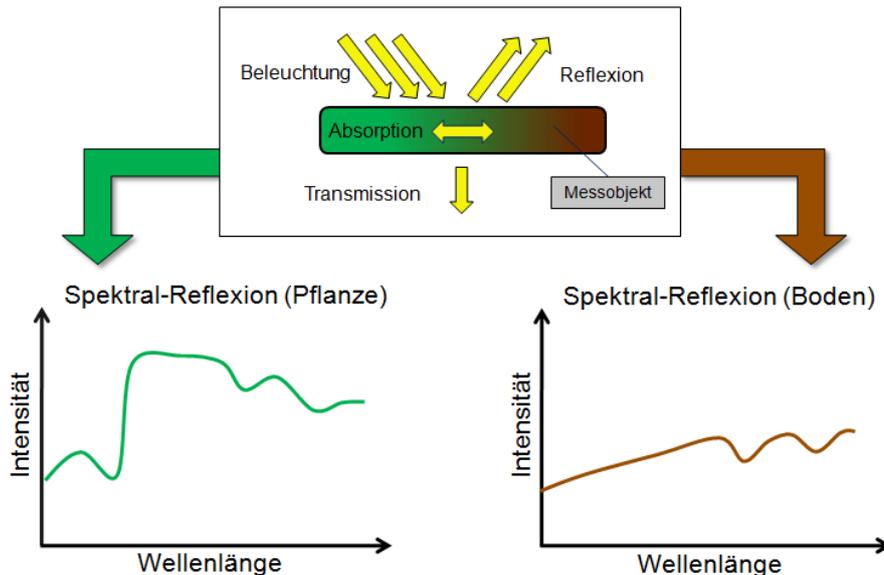


Bild 2: Vorfilterung der Spektralinformationen bei bildgebender Spektralanalyse

Bei Spektralanalysen von Pflanzen ist es dadurch möglich, ausschließlich Boden- oder Blattpixel zu selektieren und damit den Einfluss von gemischten Spektralinformationen entscheidend zu verringern.

2 Material und Methoden

Pflanzenmaterial

Für die Untersuchungen wird Brokkoli (*Brassica oleracea convar. Botrytis*), eine Kohlart aus der Familie der Kreuzblütler, verwendet. Dazu werden Pflanzen bis zum 3- und 4-Blattstadium bei ausreichender Nährstoffversorgung unter künstlicher Beleuchtung und 18°C Umgebungstemperatur im Gewächshaus vorgezogen. Die Versuchspflanzen werden anschließend für die Spektralmessungen in die Messschale des Hyperspektral-Messplatzes im Labor umgepflanzt.

Hyperspektral-Messplatz

Der Messplatz besteht aus einem Hyperspectral Imaging System und einem Linearsystem mit integrierter Messschale. Als Sensorsystem wird der Helios Core NIR der Firma EVK DI Kerschhaggl GmbH eingesetzt. Dieses System verwendet einen NIR Spektrographen der Firma Specim mit einer Eingangs-Spaltbreite von 100 μm .

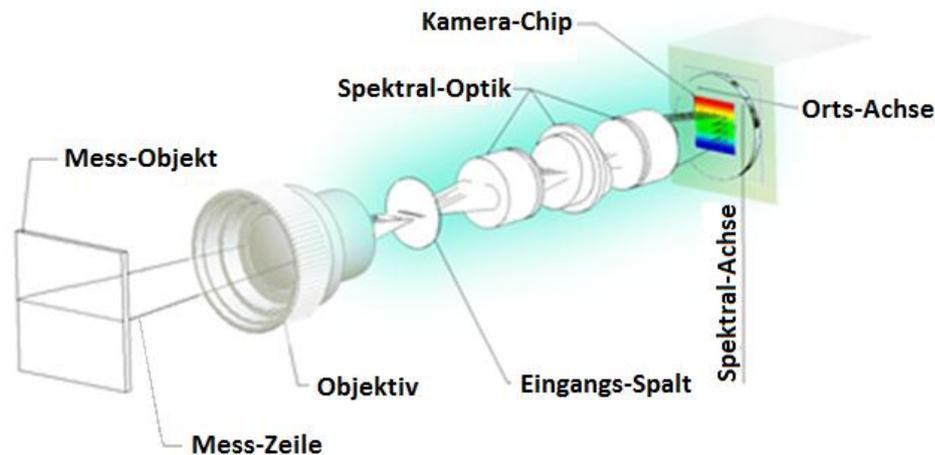


Bild 3: Funktionsweise des Spektrographen [geändert nach SPECIM.fi 2010]

Der eingesetzte Spektrograph weitet die einfallende elektromagnetische Strahlung in dem Wellenlängenbereich von 960 nm bis 1680 nm in seine Spektralbestandteile auf. Das ausgangsseitig resultierende 2D-Feld, bestehend aus der Orts-Achse der Mess-Zeile und der Spektral-Achse des aufgeweiteten Spektrums im NIR-Band, wird auf einem Kamera-Chip abgebildet. Dieser Spezial-Chip, basierend auf dem Halbleitermaterial InGaAs, wird zur Verbesserung der Signalqualität seitens des Herstellers Temperatur stabilisiert. Die räumliche und spektrale Auflösung wurde durch die Autoren in Hinblick auf die Eignung des Sensors zur bildgebenden Feuchtigkeitsanalyse untersucht (THIEL *et al.* 2010).

Versuchsdurchführung

Zur spektralen Reflexionsmessung werden die Pflanzen in die mit mineralischem Boden gefüllte Messschale des Linearsystems umgepflanzt. Um eine bessere automatisierte Auswertbarkeit zu erreichen, wird darauf geachtet, dass die Pflanzenblätter möglichst wenig überlappen und horizontal ausgerichtet sind, damit die für die Spektralanalyse verwertbare Fläche maximiert wird. Bei einer Messung befindet sich jeweils eine einzelne Pflanze in der Messschale.



Bild 4: Spectral Imaging Messsystem

Tabelle 1: Datenblatt des Messsystems

EVK Helios Core NIR	
Schnittstelle	Gigabit Ethernet
Sensor (effektiv)	252 x 240 Pixel
Auflösung	12 Bit
Spektralbereich	0,96...1,68 μm
Spaltbreite	100 μm
Max. Frequenz	330 Hz
Objektiv-Brennweite	8 mm
Objektiv-Blende	5,6
Automatisiertes Linearsystem	
Schnittstelle	USB
Antriebssystem	Schrittmotor
Geschwindigkeit	0...1 ms^{-1}
Linearhub	700 mm
Beleuchtung	2 x Halogen 65 W
Sensorabstand	800 mm (variabel)
Messschale	600 mm x 600 mm

Während einer Messung bewegt sich die Messschale, angetrieben über ein Schrittmotorgesteuertes Linearsystem, mit einer Geschwindigkeit von $0,1 \text{ ms}^{-1}$ translatorisch unter dem Sensorsystem. Seitlich des Sensorsystems sind 2 Halogenscheinwerfer mit

einer Gesamtleistung von ca. 130 W angebracht, die das zu messende Objekt in der Messschale breitbandig beleuchten. Die vom Objekt reflektierte Strahlung wird während der Bewegung zeilenweise mit einer Frequenz von 50 Hz aufgenommen.

Nach der Messung steht einen Datenwürfel, ein sog. *Hyperspectral Cube*, mit den Ortsinformationen der Mess-Zeile quer der Bewegungsrichtung (240 Pixel in Y-Richtung) und der entsprechenden Spektralinformationen im NIR-Band (252 Pixel in Z-Richtung) zur Verfügung (**Bild 5**).

Die dritte Dimension des Datenwürfels resultiert aus der Längsbewegung des Messschale und der Anzahl der Einzelmessungen während der Messfahrt (350 Pixel in X-Richtung).

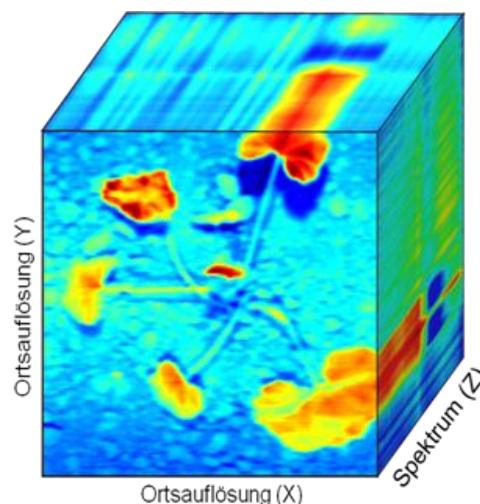


Bild 5: Hyperspectral Cube

Unmittelbar nach der Reflexionsmessung werden die Pflanzenblätter abgetrennt und deren einzelne Frischmasse über eine hochgenaue Waage gemessen. Anschließend werden sie in einem Trockenschrank bei 105°C für eine Dauer von 24 Stunden getrocknet.

$$\text{Wassergehalt} = \left\{ 1 - \frac{m_{\text{trocken}}}{m_{\text{feucht}}} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} m_{\text{trocken}} = \text{Trockenmasse} \\ m_{\text{feucht}} = \text{Feuchtmasse} \end{array} \right\}$$

Aus dem Verhältnis der Feuchtmasse zu der anschließend gemessenen Trockenmasse wird der rel. Feuchtegehalt der Einzelblätter gemäß der Gleichung 1 bestimmt.

Datenauswertung

Die Grundlage der Spektraldatenauswertung zur Feuchtigkeitsdetektion an Pflanzen bildet die Absorption elektromagnetischer Strahlung bestimmter Wellenlängen durch die

Wassermoleküle, die sie zu Verformungen bzw. Vibrationen anregt (CURRAN 1989). Besonders stark findet dieser Effekt im Mittel- und Ferninfrarot-Band statt, da dort die Grundschwingung der Anregungen zu finden ist. In schwächerem Maße finden diese Anregungen in Form von sog. Obertönen auch im NIR-Band statt (siehe **Tabelle 2**). Basierend auf diesen Absorptionsbanden wird in wissenschaftlichen Untersuchungen eine Vielzahl wasserabhängiger Indizes definiert und verwendet (siehe z.B. WU *et al.* 2009, WANG *et al.* 2009, CLEVERS *et al.* 2007). Aufgrund der vorliegenden speziellen Messanordnung mit aktiver Beleuchtung wird in dieser Arbeit deren Grundlage ein zusätzlicher Wasserindex (WI) zur Feuchtigkeitsdetektion bei Pflanzen entwickelt und untersucht.

Tabelle 2: Wasserabsorptionsbanden im NIR-Band

Wellenlänge (µm)	Anregung	Molekül
0.97	O-H Beugung	Wasser
1.20	O-H Beugung	Wasser
1.40	O-H Beugung	Wasser
1.45	O-H Streckung	Wasser
1.94	O-H Streckung, O-H Verformung	Wasser

Um die Intensitäten der Absorptionsmaxima von Wasser in Pflanzen bestimmen zu können, wurden Pflanzenblätter mit drei unterschiedlichen rel. Feuchtigkeiten von 90%, 70% und 50% im NIR-Band zwischen 960 nm und 1680 nm spektral vermessen und deren Reflexionskurven ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Absorption durch Wasser im Bereich von 1450 nm in Relation zu anderen in der Literatur aufgeführten Banden sehr stark ausgeprägt ist. Im Gegensatz zur Messung aus großer Höhe, wie z.B. durch satellitengestützte Spektral-Messsysteme, bei denen dieses Band durch die in der Atmosphäre befindlichen Wasser-Moleküle nahezu vollständig absorbiert wird (CLEVERS *et al.* 2007), kann bei pflanzennahen, bodengestützten Systemen mittels aktiver Beleuchtung auf dieses ausgeprägte Band zurückgegriffen werden.

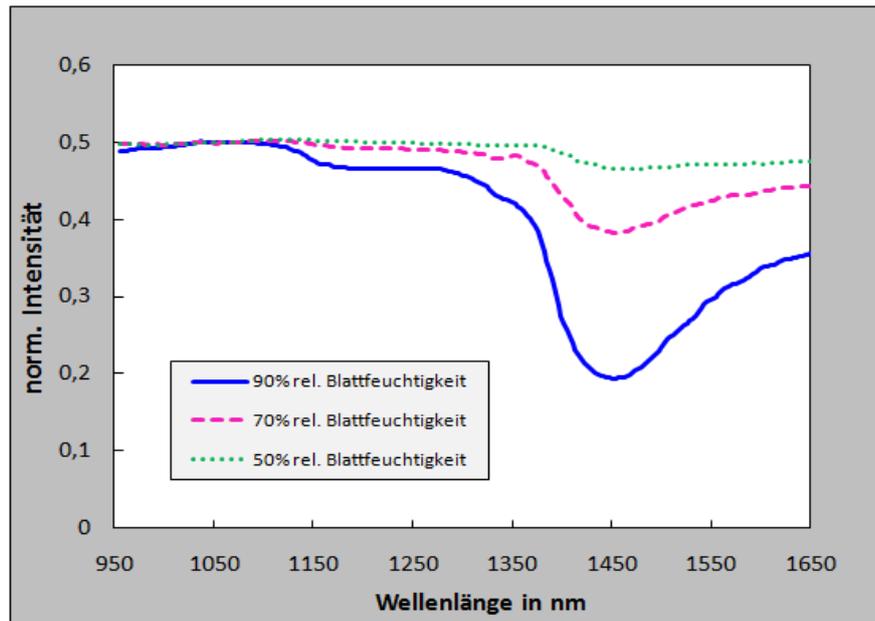


Bild 6: Blattreflexionen im NIR-Band bei unterschiedlichen rel. Feuchtigkeiten

Da die zu messenden Pflanzenstrukturen bei variierenden geometrischen Abmessungen bezogen auf die Höhe unterschiedlich stark von den Halogenscheinwerfern beleuchtet werden, ist es erforderlich, einen Wasserindex zu verwenden, dessen Wasserabhängigkeit von absoluten Reflexionswerten weitestgehend unabhängig ist.

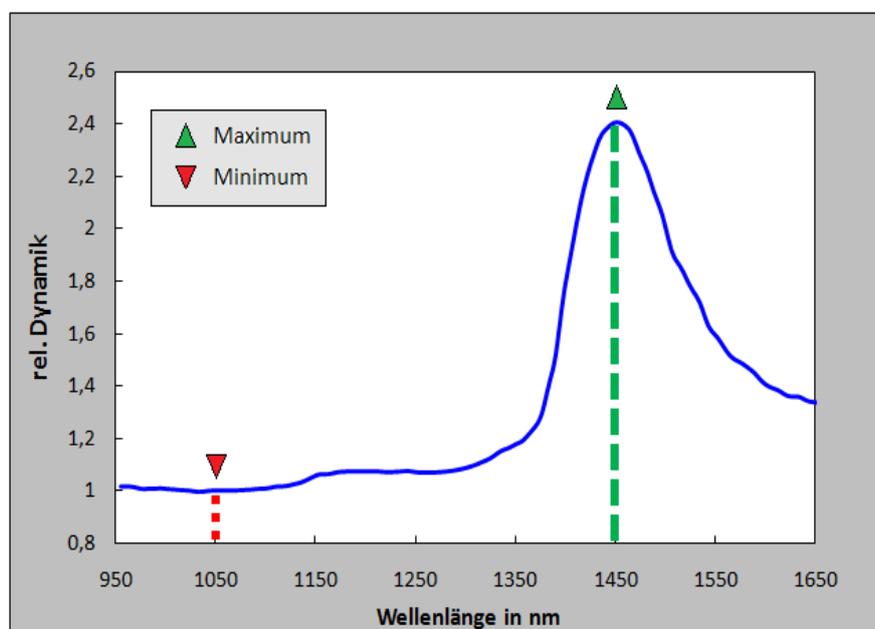


Bild 7: Dynamikbereich der Spektralverläufe bezogen auf 50% zu 90% Blattfeuchtigkeit

Dieses kann dadurch erreicht werden, dass das gesamte Spektrum auf die Reflexionsintensität einer diskreten Referenz-Wellenlänge normiert wird. Diese Referenz-Wellenlänge sollte die geringste Dynamik bei der Messung unterschiedlicher Feuchtig-

keitswerte aufweisen. Die Reflexion im Bereich der Wellenlängen von ca. 1000 nm bis 1100 nm zeigt im aufgenommenen Spektrum die geringste Dynamik bezogen auf die beiden Pflanzenmessungen von 50% und 90% rel. Feuchtigkeit. Auf Basis dieses Ergebnisses wird die Referenzwellenlänge auf 1050 nm festgelegt.

$$WI = \frac{R_{1450}}{R_{1050}} \quad (2)$$

$\left| \begin{array}{l} R_x = \text{Reflexionsintensität der Wellenlänge } x \\ WI = \text{Wasser Index} \end{array} \right.$

Ein Quotient WI (Wasserindex) wird eingeführt, der die Reflexion der Wasserabsorptions-Bande bei 1450 nm auf die Reflexionsintensität von 1050 nm normiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt 36 Einzelpflanzen mit einer durchschnittlichen Blattanzahl von 4 wurden durch das Messsystem spektral vermessen. Zusätzlich wurde von jeder Pflanze ein RGB-Bild erstellt. Nachfolgend sind die für die weiteren Berechnungen relevanten Wellenlängen und Quotienten am Beispiel einer Pflanze in Form von 2-D Intensitätsbildern dargestellt (**Bild 8**). Die genauen Feuchtigkeitswerte jedes Blattes wurden anschließend gravimetrisch durch einen Trockenschrank bestimmt. Die Werte betragen (von oben nach unten): Blatt 1: 86,19%, Blatt 2: 83,51%, Blatt 3: 85,55% und Blatt 4: 63,64%.

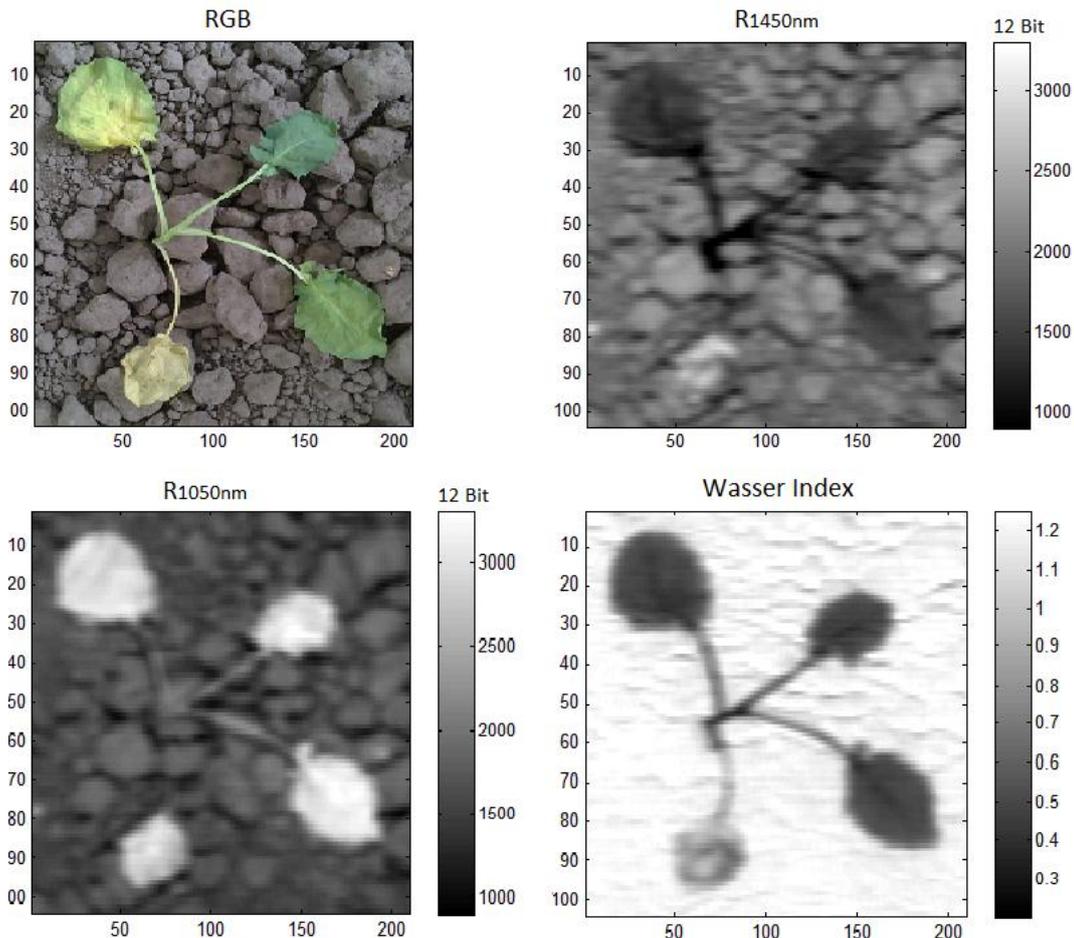


Bild 8: RGB-Bild der gemessenen Brokkoli-Pflanze (oben links); Intensitätsbild der 1450 nm Wasserabsorptionsbande (oben rechts); Intensitätsbild bei 1050 nm Referenz-Wellenlänge (unten links); Intensitätsbild der Wasserindex Berechnung (unten rechts)

Obwohl das Blatt 1 im RGB-Bild eine gelbliche Färbung hat, weist es sogar eine leicht höhere Feuchtigkeit als die Blätter 2 und 3 auf. Das Blatt 4 dagegen hat eine sehr niedrige Feuchtigkeit von ca. 64%. Die gesamten Pflanzenstrukturen der Brokkoli-Pflanze lassen sich trotz der geringen örtlichen Auflösung des Spektrolsensors eindeutig erkennen. Die Reflexion bei 1450 nm zeigt den starken Einfluss der Wasser-Absorptionsbande. Die obersten drei Blätter mit hoher Feuchtigkeit haben gegenüber dem umgebenen Boden eine geringere Reflexionsintensität. Das unterste Blatt hat im Vergleich zu den anderen jedoch eine um ca. 50% höhere Reflexionsintensität, was durch eine geringere spektrale Absorption des niedrigeren Feuchtigkeitsgehalts begründet ist. Die Intensitätsverteilung bei der Referenzwellenlänge von 1050 nm zeigt allgemein einen großen Unterschied zwischen der Pflanzenstruktur und dem umgebenen Boden auf. Das Intensitätsniveau ist bei allen 4 Blättern etwa doppelt so hoch wie beim Boden, obwohl diese auf fast gleichem Höhenlevel angeordnet sind. Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Blattreflexionen ist bei dieser Wellenlänge minimal. Der Wasserindex (WI) für diese Strukturen wird auf Basis der beiden Reflexionen R_{1450} und R_{1050} für jedes Pixel i der X- und Y-Ortsachsen berechnet.

$$WI_i(x_i, y_i) = \frac{R_{1450}(x_i, y_i)}{R_{1050}(x_i, y_i)} \quad (3) \quad \left| \begin{array}{l} x_i, y_i = \text{Orts-Koordinaten des Spektrums} \\ WI_i = \text{Wasser Index am Ort } i \end{array} \right.$$

Das Ergebnis ist ein Intensitätsbild, das entsprechend dem Einfluss der Wasserabsorptionsbande einen qualitativen Unterschied der Feuchtigkeiten aufzeigen soll (**Bild 8** unten rechts). Eine Betrachtung von Blatt 1 (oben) zeigt unterschiedlich starken Feuchtigkeitseinfluss innerhalb der Blattstruktur und lässt dabei schon auf die Hauptleitbündel des Blattes schließen.

Um die aus der Spektralanalyse berechneten Wasser Indizes mit den gravimetrischen Feuchtigkeitswerten korrelieren zu können, müssen die WI innerhalb der Blattfläche aufsummiert und gemittelt werden.

$$WI_{Blatt} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{ii=1}^m \frac{R_{1450}(x_i, y_{ii})}{R_{1050}(x_i, y_{ii})} \quad (4) \quad \left| \begin{array}{l} x_i, y_{ii} = \text{Orts-Koordinaten des Spektrums} \\ n, m = \text{Anzahl der X- und Y-Pixel} \end{array} \right.$$

Zur Auswertung muss zuvor ein Binärbild zur logischen Unterscheidung zwischen Boden und Pflanzenpixeln erstellt werden. Dafür wird ein dynamischer Intensitätsschwellwert verwendet, der in Abhängigkeit der gemessenen Strukturen berechnet wird. Als erstes wird ein Histogramm der Intensitäten aller Pixel der Messung bei der Wellenlänge 1050 nm erstellt. Da die Pflanzenstrukturen bei dieser Wellenlänge eine deutlich höhere Reflexion aufweisen als der umgebene Boden, ergibt sich daraus ein Verlauf mit mindestens 2 örtlichen Maxima. Befinden sich die Blätter der Pflanze auf unterschiedlichen Höhenlevel, können sich weitere örtl. Maxima ergeben, da die Beleuchtungsintensität durch die Halogenscheinwerfer mit größerem Bodenabstand zunimmt. Das 1. örtl. Maximum resultiert aus der geringen Reflexionsrate der Bodenpixel und deren schlechter Ausleuchtung. Diesem zugrunde liegend wird der Schwellwert zur Filterung der Pflanzenstrukturen als Wert des dem 1. örtl. Maximum folgenden örtl. Minimums definiert (siehe **Bild 9**).

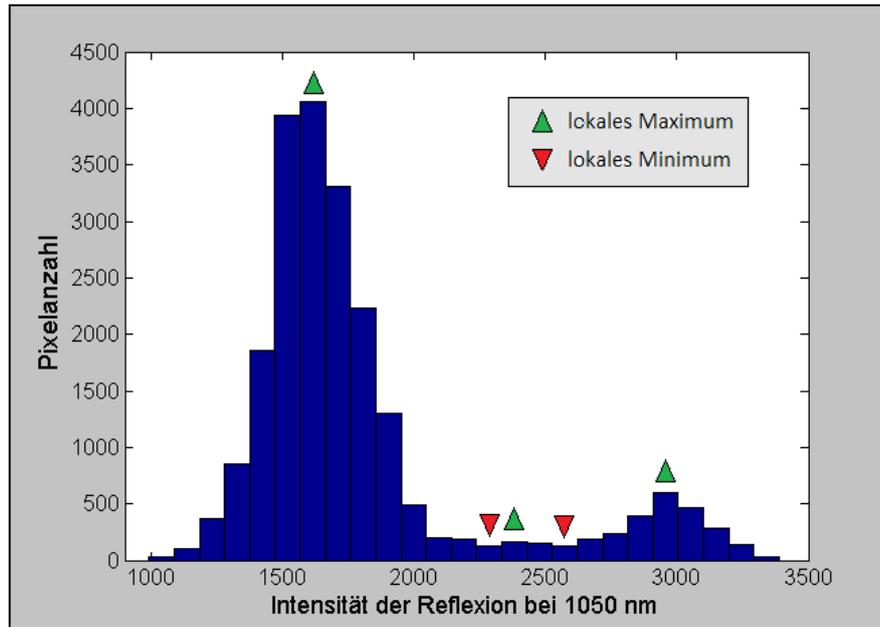


Bild 9: Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte des Hyperspectral Cubes bei WL=1050 nm

Auf Basis dieses Schwellwertes wird ein Binärbild erzeugt, welches der Unterscheidung von Pflanzenstrukturen und den Boden-Pixeln dient. Um dort kleine Strukturen, die durch Sprossachsen der Pflanze und kleine organische Substanzen im Boden erzeugt werden können, zu vermeiden, wird das Binärbild durch Erosionen und Dilationen bereinigt.

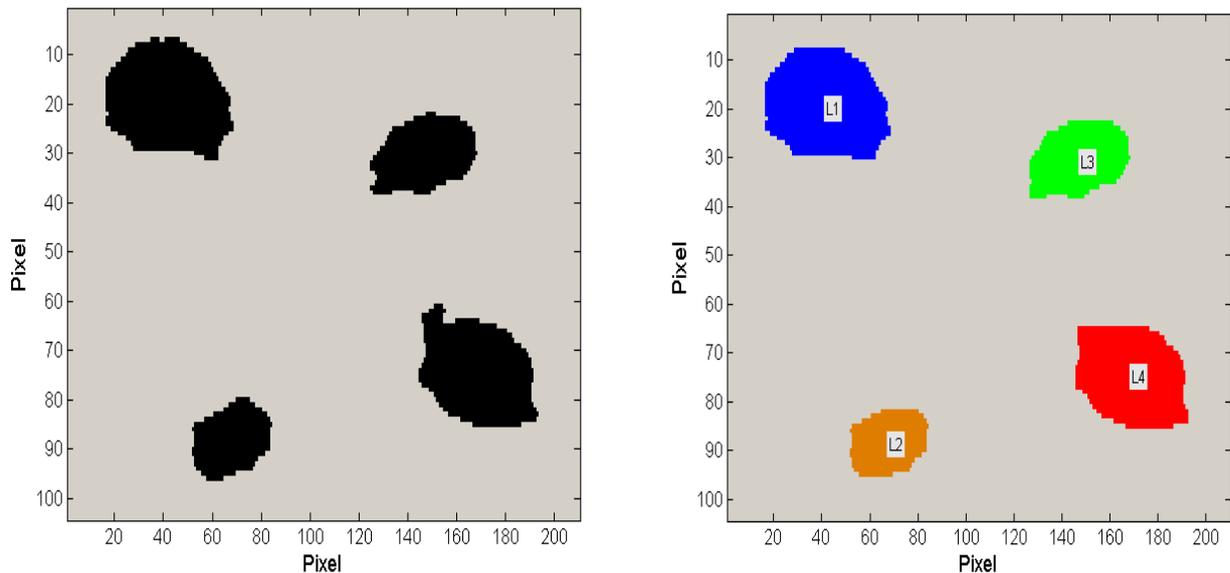


Bild 10: Binärbild der Brokkoli-Pflanze (links); Segmentiertes Binärbild der Auswertung mit eingefärbten und nummerierten Einzelblättern (rechts)

Dieses Binärbild wird daraufhin auf die Anzahl der in ihm befindlichen unabhängigen Elemente untersucht. Überlagerungseffekte bei teilweise überlappenden Pflanzenblät-

tern werden minimiert, indem die binären Blattstrukturen bis auf einen Mittelpunkt reduziert werden. In diesem Zustand werden die Elemente segmentiert und anschließend wieder auf ihr ursprüngliches Maß ausgeweitet und mit dem ursprünglichen Binärbild überlagert. Der Wasserindex dieser Einzelsegmente kann nun über deren Flächen aufsummiert und zu Einzelblatt bezogenen Mittelwerten berechnet werden. Die berechneten Mittelwerte jedes Einzelblattes aller 36 gemessenen Pflanzen sind in **Bild 11** über den durch den Trockenofen gravimetrisch bestimmten rel. Feuchtigkeiten aufgetragen.

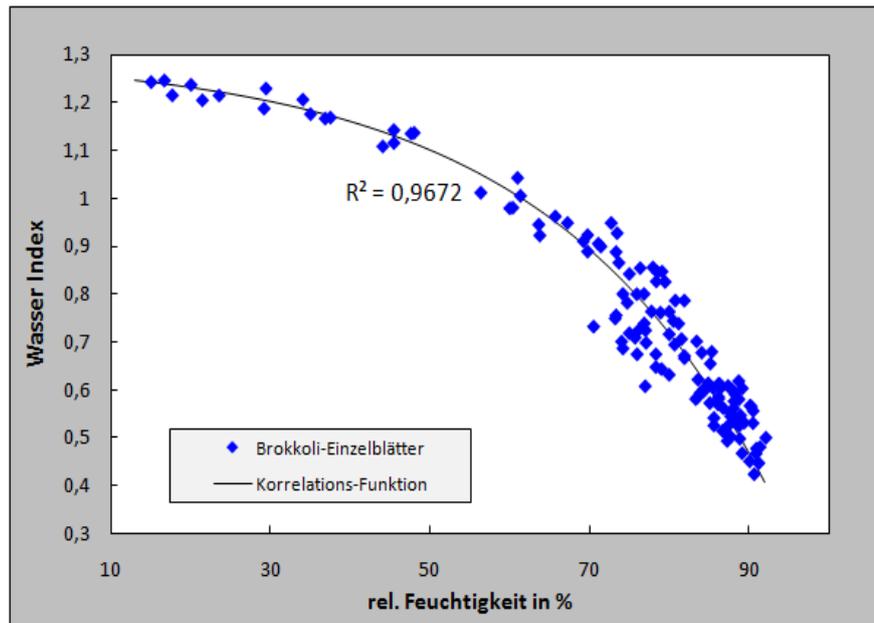


Bild 11: Korrelation zwischen spektralem Wasserindex und gravimetrischer Feuchtigkeitsbestimmung von Brokkoli Einzelblättern (Pflanzenanzahl 36, Blätteranzahl 130)

Es zeigt sich ein (negativ) exponentieller Zusammenhang zwischen dem Wasserindex (WI) und der rel. Feuchtigkeit. Der Wertebereich beginnt mit einem WI=0,4 bei einer Feuchtigkeit von ca. 90% und nähert sich zu geringeren Feuchtigkeiten asymptotisch einem Wert von ca. 1,3 an. Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation liegt bezogen auf alle Messpunkte bei $R^2=0,97$.

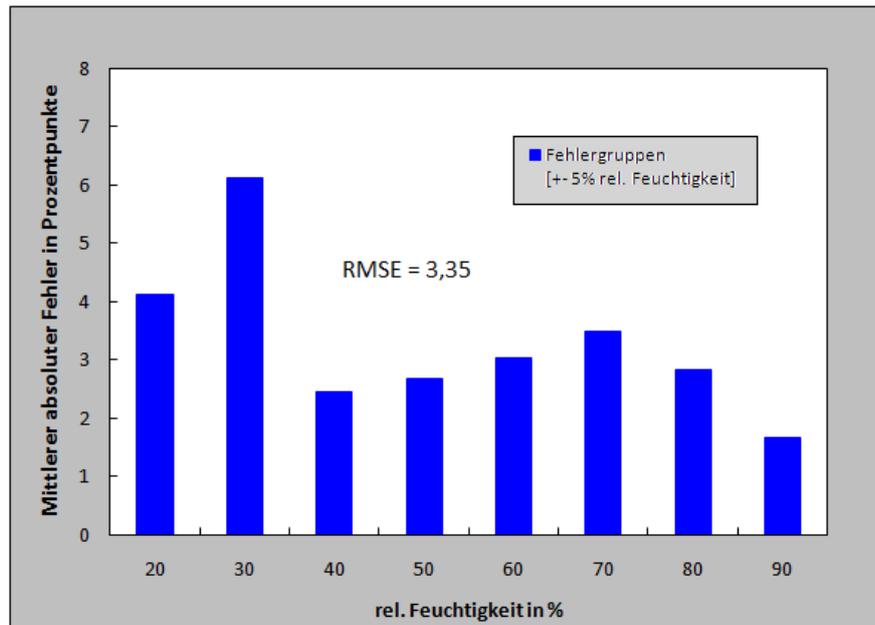


Bild 12: Mittlerer absoluter Fehler des Feuchtigkeits-Schätzwerts (eingeteilt in 8 Fehlergruppen von 20-90% rel. Feuchte mit +-5% rel. F. Gruppenbreite)

Die Analyse der absoluten Fehler ergibt, dass die Messungen von Blättern mit rel. Feuchtigkeiten von ca. 90% mit höchster Genauigkeit erfolgen (**Bild 12**). Im Gegensatz dazu ist der mittlere absolute Fehler in den letzten beiden Feuchtigkeitsgruppen von 20% und 30% mit ca. 4 und 6 Prozentpunkten am größten. Dieses resultiert aus der sehr geringen Steigung der Korrelationsfunktion in diesem Bereich, was bei kleinen Ungenauigkeiten im spektralen Wasserindex zu großen Abweichungen im Schätzwert der rel. Feuchtigkeit führt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

y_i = gemessener Wert,
 \hat{y}_i = Schätzwert
 n = Anzahl der Messungen
 $RMSE$ = Schätzwert-Fehler

Unter Einbeziehung aller 130 Messpunkte im gesamten Messbereich zwischen 10% und 92% rel. Feuchtigkeit der Blätter beträgt der RMSE (KVALHEIM 1987) als Maß des mittleren Schätzwert-Fehlers bezogen auf die ermittelte Korrelationsfunktion 3,35 Prozentpunkte.

4 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Arbeit wurde die Dynamik unterschiedlicher Wasser-Absorptionsbanden im NIR Spektralbereich untersucht. Auf Basis dieser Untersuchung wurde eine geeignete Referenz-Wellenlänge zur Kompensation variierender absoluter Reflexionswerter identifiziert. Ein Wasserindex (WI) zur Analyse der rel. Feuchtigkeit in Pflanzen-

blättern wurde eingeführt. In einer in-situ Messreihe wurde die spektrale Signatur von 36 Brokkoli-Pflanzen mit insgesamt 130 Einzelblättern mit einem NIR Hyperspectral Imaging System und einer speziell entwickelten Messvorrichtung vermessen. Die Spektraldaten wurden für die automatisierte Analyse der Blattflächen durch dynamische Schwellwertbildung vorgefiltert, aufbereitet und in Blattflächen segmentiert. Es wurden für die jeweiligen Einzelblätter Mittelwerte des WI aus den Spektraldaten berechnet und parallel die rel. Feuchtigkeiten gravimetrisch mittels Trockenschrank bestimmt. Der Feuchtigkeitsbereich der Blätter lag dabei im Bereich von ca. 15% bis 92%. Die Korrelation des WI und der rel. Feuchtigkeit ergab einen exponentiellen Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,97$ und Schätzwert-Fehler von $RMSE = 3,35$ Prozentpunkte. Der Betrag des mittleren absoluten Fehlers von 2,64% rel. Feuchtigkeit ist nicht im gesamten Messbereich gleichverteilt sondern abhängig von der Feuchtigkeit. Aufgrund der geringen Steigung der Korrelationsfunktion im Bereich geringer Feuchtigkeiten ist der mittlere abs. Fehler bei Blattfeuchtigkeiten $< 30\%$ am größten.

Die Messungen haben gezeigt, dass mittels bildgebender Spektralanalyse die Pflanzeigenschaften in-situ trotz Vorhandensein umgebener Bodenstrukturen messbar sind, da durch Methoden der Bildverarbeitung gewünschte Spektralsignaturen vorselektiert werden können. Die Messung der rel. Feuchtigkeit von Einzelblättern mittels WI-Berechnung konnte eine hohe Genauigkeit erzielen und zeigt damit das Potential auf, spektrale Feuchtigkeitsanalysen an Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen auch im Gewächshaus einsetzen zu können.

5 Danksagung

Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „BoniRob“ vom Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) gefördert.

Literaturverzeichnis

- BURKE M.W. (1996):** Image Acquisition, vol. 1 of Handbook of machine vision engineering, Chapman & Hall, London
- CLEVERS J., KOOISTRA L., SCHAEPMAN E. (2007):** Estimating canopy water content using imaging spectroscopy, Proceedings 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy
- CURRAN P.J. (1989):** Remote sensing of foliar chemistry. Remote Sensing of Environment, Ausgabe 30, S. 271-78
- GROELL K., GRAEFF S., CLAUPEIN W. (2006):** Use of leaf-based sensor technologies to assess the effects of various plant diseases on wheat growth and development"; Proceedings of CIGR EurAgEng/ VDI-MEG
- HELLEBRAND H.J., DAMMER K.H., BEUCHE H., HERPPICH W.B., FLATH, W. (2005):** Infrarotbildverfahren im Pflanzenschutz, Landtechnik 60, S. 142-143

- KVALHEIM O. (1987):** Latent-structure decompositions (projections) of multivariate data, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, S. 282-290
- LARSOLLE A., MUHAMMED H. (2007):** Measuring crop status using multivariate analysis of hyper-spectral field reflectance with application to disease severity and plant density Precision Agric
- RUCKELSHAUSEN A., BIBER P., DORNA M., GREMMES H., KLOSE R., LINZ A., RAHE F., RESCH R., THIEL M., TRAUTZ D. WEISS U. (2009):** BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping, Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, pp. 841-847
- SMOLYAR N. (2006):** Bildgebende Spektroskopie an Pflanzenblättern. Dissertation, Universität Heidelberg, 2003. Thomas, E.: Feldversuchswesen, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, ISBN 3-5252-8319-4 (UTB)
- THIEL M., RATH T., RUCKELSHAUSEN A. (2010):** Plant moisture measurement in field trials based on NIR spectral imaging – a feasibility study, 2nd International Workshop on Image Analysis in Agriculture, pp 16-29
- WANG J., XU R., YANG S. (2009):** Estimation of plant water content by spectral absorption features centered at 1,450 nm and 1,940 nm regions, Environ Monit Assess, S. 459-469
- WU C., NIU Z., TANG Q., HUANG H. (2009):** Predicting vegetation content in wheat using normalized difference water indices derived from ground measurements, Journal of Plant Research, Ausgabe 122 S. 317-326