

Eignung spektraler Signaturen zur Lokalisierung von Schwefelmangel in Raps mit Hilfe der Fernerkundung

Holger Lilienthal und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Die bedeutendste Quelle für die Versorgung von Kulturpflanzen mit Schwefel war bis Anfang der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts der Eintrag aus der Atmosphäre. Infolge umfangreicher Maßnahmen zur Rauchgasentschwefelung wird heute jedoch der Entzug durchschnittlicher Raps- und Getreideernten durch natürliche Schwefeleinträge nicht mehr gedeckt. Sofern keine schwefelhaltigen Düngemittel eingesetzt werden, können akute Mangelerscheinungen in den Pflanzenbeständen auftreten.

Raps hat einen hohen Bedarf an Schwefel und zeigt bei unzureichender Schwefelversorgung Mangelsymptome, die in allen Wachstumsstadien und an allen Teilen der Pflanze auftreten können. Charakteristisch für Schwefelmangel in Raps ist unter anderem das Auftreten weißer Blüten im Gegensatz zu gelben Blüten gut versorgter Bestände. Diese einfache visuelle Diagnose von Schwefelmangel erlaubt es, prinzipiell auch Mangelstandorte mit Techniken der Fernerkundung zu lokalisieren.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden die spektralen Signaturen von Raps vorgestellt und analysiert, und die Eignung der Spektralinformation zur Identifizierung von Schwefelmangel mit Hilfe der Fernerkundung diskutiert.

Schlüsselwörter: *Fernerkundung, Raps, Schwefelmangel, Spektrometrie*

Summary

Since decreasing atmospheric sulphur inputs and changes in fertiliser practices towards low or no sulphur containing sources for nitrogen and phosphorous, sulphur has become a major limiting factor for plant production in industrialised as well as remote rural areas.

The most important indication of an insufficient sulphur supply of oilseed rape are deficiency symptoms, which can occur at all growth stages and all parts of the plant. Symptoms of sulphur deficiency increase with elevated nitrogen levels, so that after nitrogen fertilization crop canopies reveal site-specific patches. In oilseed rape sulphur deficiency is characteristic during flowering since the colour of the flowers is changing from a bright yellow to pale yellow or white.

Optical remote sensing can be utilised to detect and map sulphur deficiency in oilseed rape. It also delivers valuable input information for modelling the

risk potential of sulphur deficiency (e.g. crop rotations, site specific heterogeneity structures) and it allows a view into the past by using available archive data. Spectral signatures of oilseed rape are presented and the suitability of spectral signatures for the detection of sulphur deficiency in oilseed rape with remote sensing is discussed.

Key words: *oilseed rape, remote sensing, sulphur deficiency, spectroradiometry*

Einleitung

Schwefel zählt zu den pflanzlichen Hauptnährstoffen und findet sich in Eiweißbausteinen, Enzymen und Vitaminen, sowie sekundären Inhaltsstoffen in den Pflanzen wieder.

Als Folge der vor 20 Jahren begonnenen Einführung von Rauchgasentschwefelungen in Kraftwerken sowie der Verwendung von schwefelarmen Treibstoffen, ist Schwefelmangel in Nordeuropa zur häufigsten Ernährungsstörung von Kulturpflanzen geworden (Schnug & Haneklaus, 1998).

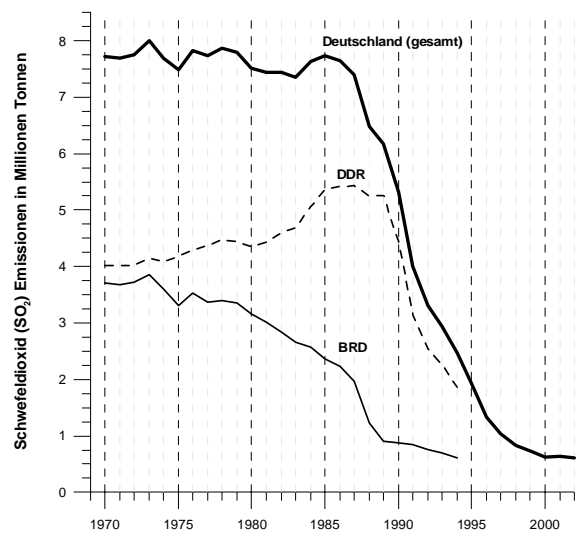


Abb. 1: Jährliche Schwefeldioxid-Emissionen in Deutschland) von 1970 bis 2002 (vor 1994 Summen der Werte für die Gebiete der BRD und DDR). (Daten: Umweltbundesamt 2004)

Abbildung 1 zeigt die jährlichen Schwefeldioxid-Emissionen von 1970 bis 2002. Die Schwefeldioxid-Emissionen waren Anfang der siebziger Jahre mit fast 8 Mio. Tonnen am höchsten und sind seither um mehr

als 92% auf ca. 0,6 Mio. Tonnen im Jahr 2002 gesunken (Umweltbundesamt, 2001).

Seit 1987 ist ein besonders starker Rückgang zu erkennen, der auf das Wirken der Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV, 1983) in den westlichen Bundesländern zurückzuführen ist. Ab 1989 führte die Stilllegung vieler Betriebe in den östlichen Bundesländern sowie der Einsatz von Rauchgasentschwefelungsanlagen auch auf dem Gebiet der ehemaligen DDR zu einem weiteren Rückgang der Schwefeldioxid-Emissionen.

Raps hat wegen seines hohen Gehaltes an Eiweiß und Senfölen einen besonders hohen Bedarf an Schwefel. Der Anbau spielte jedoch in Deutschland lange Zeit kaum eine Rolle, da das Rapsöl Erucasäure enthielt, die einen bitteren Beigeschmack lieferte. Durch züchterische Erfolge standen zu Beginn der siebziger Jahre erucasäure-freie Sorten (0-Raps) zur Verfügung. Die Verwertung des eiweißreichen Presskuchens aus der Ölgewinnung als Viehfutter wurde aber durch den hohen Gehalt an Senfölen (Glucosinolate) beeinträchtigt, da Metabolite der Glucosinolate zu Stoffwechselstörungen führen können (Biosicherheit, 2004). Weitere Züchtungserfolge lieferten Mitte der achtziger Jahre erucasäure-freie und glucosinolat-arme Sorten (00-Raps). Damit wurde der Rapsanbau wirtschaftlich interessant und die Anbaufläche stieg deutlich an (Abb. 2).

Neben der Lebensmittelindustrie wird Raps verstärkt auch für die Treibstoffproduktion (Bio-Diesel) angebaut. Da Raps als nachwachsender Rohstoff gilt, darf er auch auf Stilllegungsflächen angebaut werden. Der Anreiz wird durch gezahlte Prämien sogar noch erhöht, so dass in den Jahren 1999-2001 ca. 350.000

ha Stilllegungsflächen mit Raps bestellt wurden. Das entspricht ca. 30% der gesamten Rapsflächen (Biosicherheit, 2004).

Die Bedeutung des Rapsanbaus zeigt sich darin, dass bezogen auf die gesamte Ackerfläche in Deutschland auf mehr als 10% der Fläche Raps angebaut wird (Statistisches Bundesamt: Agrarstrukturerhebung, 2003).

Der verminderte atmosphärische Schwefeleintrag einerseits und die Ausweitung des Rapsanbaus sowie die höheren Ansprüche an die Schwefelversorgung von 00-Sorten (Schnug & Haneklaus, 2005) andererseits führen seitdem verstärkt zu Mangelsymptomen in Rapsbeständen. Die Schwefelmangelsymptome sind in Raps sehr ausgeprägt und können in allen Wachstumsstadien und an allen Teilen der Pflanze auftreten (Schnug & Haneklaus, 2005). Bei Schwefelmangel wird Stickstoff entsprechend geringer verwertet, so dass sich das Risiko unerwünschter Stickstoffausträge in die Umwelt erhöht. Schwefelmangelsymptome verstärken sich mit steigendem Stickstoffniveau, so dass Bestände nach einer Stickstoffdüngung häufig fleckig erscheinen (Schnug & Haneklaus, 1994).

Ein besonders ausgeprägtes Merkmal für Schwefelmangel in Raps ist die Ausbildung von kleineren weißen Blüten (Abb. 3 rechts) im Gegensatz zu gut versorgten gelben Blüten.

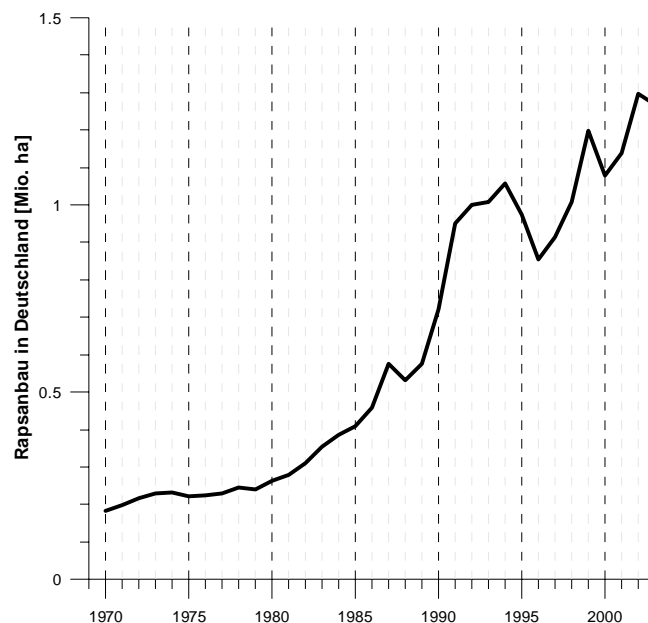


Abb. 2: Raps-Anbauflächen in Deutschland von 1970 bis 2003. (Quelle: FAOSTAT, 2004)



Abb. 3: Vergleich von Rapsblüten ohne (links) und mit makroskopischem S-Mangelsymptomen (rechts). (Quelle: Schnug & Haneklaus, 1994)

Auf der Maßstabsebene eines Feldes erscheinen Rapsschläge mit S-Mangel zur Blütezeit uneinheitlich, da aufgrund der kleineren Blüten die grünen Blätter und Stängel durchscheinen (Abb. 4). Das Erkennen von Schwefelmangel erfordert ein hohes Maß an Erfahrung vom Kartierer, ferner kann Schwefelmangel derzeit nur lokal durch Feldbegehungen erfasst werden. Der Einsatz von Fernerkundung zur Kartierung von S-Mangel in Raps auf regionalem Maßstab wäre jedoch eine kostengünstige Alternative. Dazu müssen zunächst die spektralen Eigenschaften von Rapsblüten mit unterschiedlicher Schwefelversorgung untersucht werden.

Material und Methoden

Im Feldversuch wurden Rapspflanzen kultiviert, die (a) optimal mit Schwefel versorgt waren oder (b) nicht mit Schwefel gedüngt wurden. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus ist bei Salac (2004) zu finden.

Zur Blüte wurden jeweils insgesamt drei Blüten (12 Kronblätter) spektral mit einem ASD Fieldspec[®] Pro JR Spektrometer mit *Plant probe* Aufsatz vermessen. Neben den Kronblättern wurde auch Blatt-, Stengel- und Schotenmaterial spektral erfasst.



Abb. 4: Vordergrund: Mit Schwefel gedüngtes Rapsfeld. Hintergrund: nicht S gedüngtes Rapsfeld. (Quelle: Schnug & Haneklaus, 1994)



Abb. 5: Messaufbau zur spektralen Vermessung gelber und weißer Rapsblüten mit einem ASD-Fieldspec® Pro JR Spektrometer mit *plant probe* Messkopf

Die Verwendung des *Plant Probe* Messkopfes garantiert einen konstanten Abstand zwischen Mess-Sensor und Probe, sowie einheitliche Beleuchtungsbedingungen. Jede Probe wurde in 4 Parallelen gemessen, jede Parallele bestand aus dem Mittelwert von 40 Wiederholungsmessungen. Vor und nach jeder Probe wurde das Spektrometer auf ein Spektral® – Panel als Weißreferenz kalibriert (s. Abb. 5)

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Spektralanvermessung für unterschiedlich mit Schwefel versorgte Rapsblüten sind in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzlich wurde zum Vergleich das Spektrum eines grünen Rapsblattes abgebildet.

Auffällig sind die unterschiedlichen Amplituden der Reflexionsspektren der weißen und gelben Blütenblätter. Der Verlauf der beiden Kurven ist ab 500 nm nahezu identisch, nur die absolute Reflexion liegt bei den gelben Kronblättern ungefähr um 20%

höher als bei den weißen Blütenblättern. Ab 750 nm verlaufen die Spektralsignaturen der Kronblätter identisch mit der Reflexionssignatur von grünem Pflanzenmaterial.

Charakteristische Unterschiede zwischen gelben und weißen Kronblättern finden sich vor allem im kurzwelligeren Spektralbereich. Insbesondere im ultravioletten Licht (350–380 nm) zeigen sich die größten Unterschiede. Abbildung 7 zeigt den Ausschnitt des Gesamtspektrums von 350–440 nm.

Die gut versorgten, gelben Blütenblätter der Rapspflanzen reflektieren ca. 25% des einfallenden UV-Lichtes (350 nm) und damit fast doppelt soviel wie die schlecht mit Schwefel versorgten weißen Blätter (12,5%). Die Unterschiede nehmen dann zum sichtbaren blauen Licht hin ab, bei 420 nm bestehen dann keine Reflexionsunterschiede mehr.

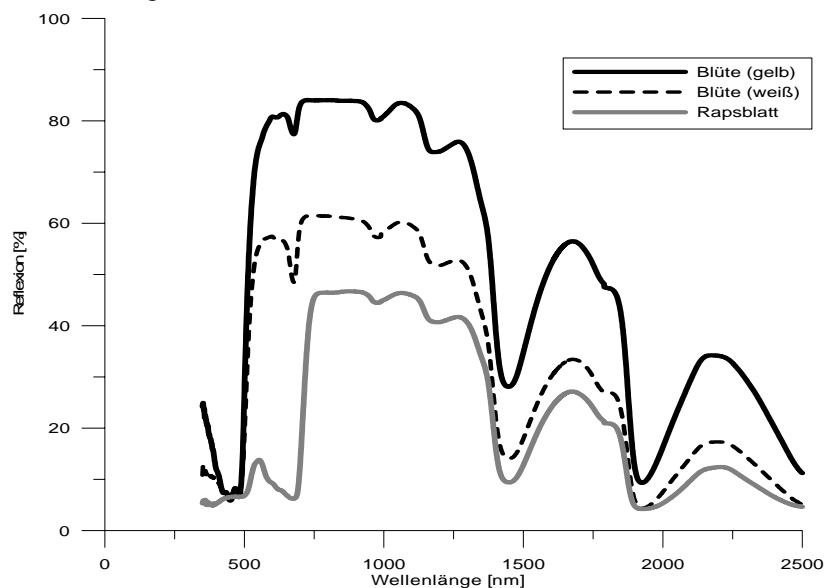


Abb. 6: Spektralkurven von gelben und weißen Blütenblättern von Raps, sowie eines grünen Rapsblattes

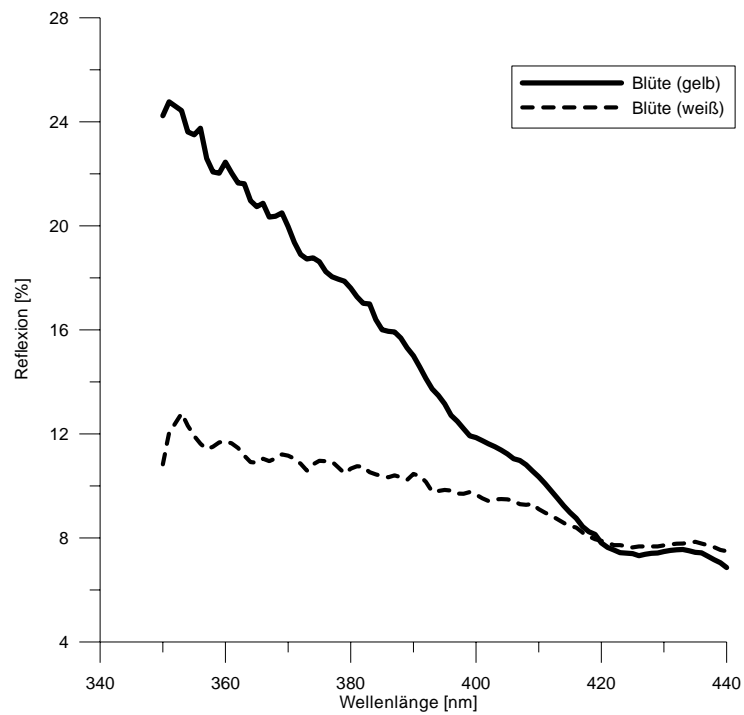


Abb. 7: Ultraviolette Spektralsignaturen eines gelben und eines weißen Blütenblattes von unterschiedlich mit Schwefel versorgten Rapspflanzen

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm (Abb. 8) zeigen sich hauptsächlich Unterschiede in der Reflexionshöhe. Der auffälligste Unterschied zeigt sich in der Absorptionstiefe um

680 nm. Hier absorbiert das schlechter mit Schwefel versorgte weiße Blatt deutlich stärker, als das gut mit Schwefel versorgte gelbe Blatt.

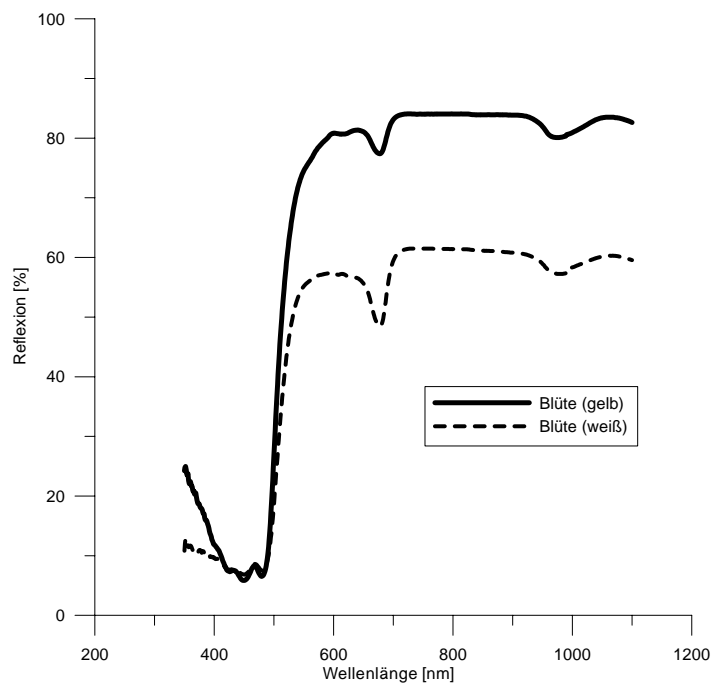


Abb. 8: Spektralsignaturen eines gelben und eines weißen Blütenblattes von unterschiedlich mit Schwefel versorgten Rapspflanzen im sichtbaren Wellenlängenbereich

Diskussion

Die spektralen Unterschiede von gelben und weißen Rapskronblättern sind am deutlichsten im kurzwelligen Spektralbereich zu finden. Rapspflanzen mit Schwefelmangel reflektieren weniger ultraviolettes Licht als gut versorgte Pflanzen. Die geringere UV-Reflexion der schlecht mit Schwefel versorgten Pflanzen kann somit einen Einfluss auf die Attraktivität der Blüten auf die bestäubenden Insekten haben, da diese gut im UV-Bereich sehen können (Burkhardt, 1988). Faktoren, die eine geringe Attraktivität von Schwefelmangel in Raps für Bienen bedingen, werden von Haneklaus et al. (2005) diskutiert.

Für den Einsatz der Fernerkundung ist dieser Spektralbereich aber wegen der starken Absorption der Atmosphäre nicht geeignet.

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zeigt sich ein deutliches Absorptionsmaximum von 676–679 nm. Hier wird das Licht von der Pflanze mit Schwefelmangel deutlich stärker absorbiert. Der Bereich von 680 nm wird bei grünen Pflanzen durch die Absorption von Chlorophyll a+b erklärt. Billings und Morris (1951) haben bereits gezeigt, dass eine deutliche Absorption auch bei chlorophyllfreien Blättern in diesem Wellenlängenbereich auftritt. Erklären lässt sich diese Absorption durch weitere Pigmente, wie Karotinoide, Xanthophylle und Anthocyane. In grünen Blättern sind die Konzentrationen dieser Pigmente 10-mal kleiner als die von Chlorophyll, das dann durch seine starke Absorption andere Pigmente überlagert (Verdebout et al., 1994). Die gelbe Farbe von Blütenblättern wird durch Flavone und Flavonole hervorgerufen (Herzmann, 1962). Über die genauen spektralen Eigenschaften dieser Pflanzenfarbstoffe gibt es jedoch

nur wenige Informationen. Haneklaus et al. (2005) berichten von einem hypsochromatischen Effekt von Flavonolen, der zu einer Reflexionszunahme im kurzwelligen Bereich führt. Fehlen die Flavonole z. B. in Folge von Schwefelmangel, kommt es zu einer Abnahme der Reflexionsstärke. Dieser Effekt wird im ultravioletten Bereich durch diese Untersuchung bestätigt (Abb. 7).

Um Unterschiede in der Absorptionstiefe zwischen weißen und gelben Rapsblüten bestimmen zu können, eignen sich mathematische Verfahren (Lilienthal et al., 2000). Kokaly und Clark (1999) haben die Methode der "band-depth analysis" oder "Continuum removal" entwickelt. Mit diesem Verfahren können auch sehr geringe Absorptionsunterschiede bestimmt werden (Abb. 9).

Als Kontinuum wird in diesem Falle eine mathematische Funktion zur Isolierung einzelner Absorptionsbereiche bezeichnet, um anschließend die Stärke der Absorption bestimmen zu können.

Dieses Verfahren eignet sich bei Spektralmessungen mit hochauflösenden Spektrometern sowie Hyperspektralsensoren. Der nahe und mittlere Infrarotbereich unterscheidet sich bei gelben und weißen Rapsblüten nur durch die Höhe der Reflexion, nicht aber in der Form. Das Reflexionsverhalten von Pflanzen in diesem Wellenlängenbereich wird durch die Zellstruktur und den Wassergehalt bestimmt. Hier bestehen keine großen Unterschiede zwischen den Blütenblättern. Die Unterschiede in der Amplitude der Reflexion lassen sich mit der Biomasse erklären. Die Blütenblätter von Schwefelmangelpflanzen sind kleiner ausgebildet als die Blätter gut versorgter Pflanzen.

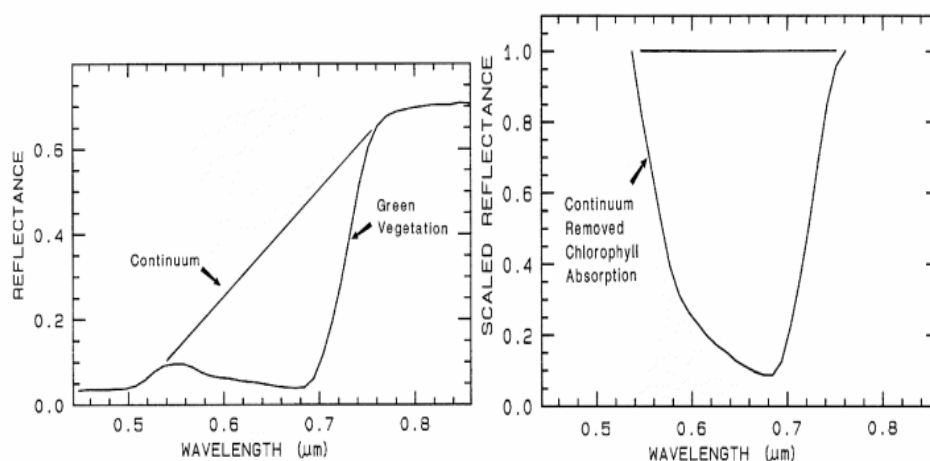


Abb. 9: Original Vegetationsspektrum und Spektrum nach Modellierung mit "Continuum removal" für die Chlorophyll-Absorption (Clark, 1999)

Damit ergibt sich für gut versorgte Pflanzen auch eine höhere Biomasse bei den Kronblättern (Haneklaus et al., 2005). Eine Zunahme der Biomasse führt gleichzeitig auch zu einer erhöhten Reflexion im infraroten Spektralbereich (Clevers, 1986; Schellberg, 1990).

Der infrarote Wellenlängenbereich allein reicht nicht, um die unterschiedlichen Blütenfarben zu charakterisieren. Bezieht man aber die starke Absorption um 680 nm mit ein, so lässt sich durch die Berechnung des Wendepunktes des Spektrums zwischen 680 und 726 nm ein Maß, ähnlich des „Red Edge Inflection Point“ (REIP) berechnen.

Die direkte Bestimmung von spektralen Merkmalen, die durch Schwefelmangel in der Reflexionssignatur von Rapsblüten hervorgerufen werden, erfordert hochauflösende Spektralmessungen, die in der Praxis sehr selten verfügbar sind.

Betrachtet man Rapsfelder mit Schwefelmangel, so erscheinen diese fleckig und aufgrund der kleineren Blütenblätter scheint viel unterliegendes grünes Blattmaterial hindurch (Abb. 4). Dieses Erscheinungsbild kann man sich fernerkundlich zu nutze machen:

Das Konzept der spektralen Entmischung auch *spectral mixture analysis* (SMA), (Adams et al., 1989), geht davon aus, dass das Reflexionssignal eines Pixels in einem Satellitenbild nie aus einem reinen Material, sondern immer aus der Mischung mehrerer Komponenten, wie zum Beispiel Boden, Blatt- und Blütenmaterial zusammengesetzt ist. Wenn die Einzelbestandteile (endmember) der Reflexionssignatur bekannt sind, lassen sich die prozentualen Anteile der endmember bestimmen und so Aussagen über den Anteil von Blüten- und Blattmaterial für jedes Pixel bestimmen. Gut mit Schwefel versorgte Bestände werden zur Blüte einheitlich 'Gelb' erscheinen (Abb. 4), schlecht versorgte Bestände werden sich spektral dagegen als Mischung von Blatt- und Blütenmaterial darstellen.

Erste Versuche mit diesem Verfahren zeigen gute Ergebnisse, allerdings ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Anzahl von Bildern innerhalb der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Bei einer Aufnahme zum Ende der Rapsblüte kann es zu Fehlinterpretationen kommen, da nach der Blüte wieder mehr grünes Blattmaterial sichtbar wird.

Die Analyse der Spektralsignaturen zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Schwefelmangel anhand der Blütenfarbe zu diagnostizieren. Für eine regionale Anwendung fehlen aber derzeit noch die geeigneten operationell verfügbaren Sensoren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Institut für Geographie der Universität Göttingen, Abteilung Kartographie, GIS & Fernerkundung, insbesondere bei Dr. Stefan Erasmi für die Unterstützung bei den Spektralmessungen.

Literatur

- Adams JB, Smith MO, Gillespie AR** (1989) Simple models for complex natural surfaces. A strategy for the hyperspectral era of remote sensing. Proceedings of the IGARSS Symposium 10-14 July 1989, Vancouver, Canada pp 16-21
- Billings WD, Morris RJ** (1951) Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups. *Am J of Botany* 38:327-331
- Biosicherheit** (2002) Rapsanbau in Deutschland - Schub durch Null-null-Raps [online]. zu finden in: <<http://www.biosicherheit.de/raps/47.doku.html>>, 21.03.2002 [zitiert 21.06.2004]
- Burkhardt D** (1988) Die Welt mit anderen Augen. - *Aus Forschung und Medizin*. Vol. 2/88: 49-62
- Clevers JPGW** (1986) Application of remote sensing to agricultural field trials. Wageningen, Niederlande, Univ., Diss. 227 p
- Faostat** (2004) FAOSTAT database collection [online], zu finden in <<http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture>>, 24.05.2004 [zitiert 21.06.2004]
- Haneklaus S, Brauer A, Bloem E, Schnug E** (2005) Relationship between sulphur deficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.) and its attractiveness for honey bees. - *FAL – Agricultural Research* 283: 37-43
- Herzmann H** (1962) Pflanzenfarbstoffe. Westarp Wissenschaften, 52 p
- Kokaly RF, Clark RN** (1999) Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote sensing of environment*. 67: 267-287
- Lilienthal H, Haneklaus S, Schnug E, Haveresch E** (2000) Utilisation of hyperspectral data for the evaluation of the spatial variability of the nitrogen status of wheat. *Asp Appl Biology* 60,: 189-194
- Salac I** (2004) Influence of the sulphur and nitrogen supply on S metabolites involved in Sulphur Induced Resistance (SIR) of *Brassica napus* L. PhD thesis, University Braunschweig
- Schellberg J** (1990) Die spektrale Reflexion von Weizen. Ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung. Bonn, Univ., Diss. 160 p
- Schnug E, Haneklaus S** (1994) Sulphur deficiency in *Brassica napus*: biochemistry, symptomatology morphogenesis. - *Landbauforsch Völkenrode* : SH Vol.144, 31 p
- Schnug E, Haneklaus S** (1998) Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug E, Beringer H (ed) Sulphur in Agro-Ecosystems. Vol. 2 of the series 'Mineral

Nutrition in Ecosystems', Kluwer Academic Publ. Dordrecht, 1998, 1-38

Schnug E, Haneklaus S (2005) Sulphur deficiency symptoms in oilseed rape (*Brassica napus* L.) - the aesthetics of starvation. *Phyton* 45: 79-96

Statistisches Bundesamt (2003) Bodennutzungshaupterhebung 2003

Umweltbundesamt (2001) Luft kennt keine Grenzen

Umweltbundesamt (2004) SO₂ Emissionen in Deutschland [online]. Deutschland, zu finden in http://www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/bericht/aktuelle_daten/schadstoffe/_svgdata/so2.html [zitiert 21.06.2004]

Verdebout J, Jacquemoud, Schmuck G (1994) Optical properties of leaves: Modeling and experimental studies. In: Hill J, Mégier J (eds) *Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations*, Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp 169-193, ISBN 0-7923-2965-1