

Reflexionsspektren und Computer-Bitmaps zur Erfassung und Quantifizierung von Chlorosen und Nekrosen an Blättern

Willy Werner und Clement Atzberger

Synopsis

Leaf reflectance spectra and computer bitmaps for recording and evaluation of chlorosis and necrosis on leaves

For investigations in plant vitality or in bioindication (caused e. g. by air pollution) it is necessary to measure the chlorophyll contents and areas of chlorotic and/or necrotic parts of leaves with non destructive methods and with high accuracy. Therefore two methods are presented:

1. Registration of reflectance spectra of leaves and calculation of chlorophyll content on basis of correlation with single wavelengths, logarithm of reverse reflectance of single wavelengths and red edge respectively blue edge position of reflectance spectra without disturbance of the plant. The logarithm of reverse reflectance of $\lambda = 524$ nm gives the highest correlation coefficient ($r^2 = 0.916$) to chlorophyll content measured in acetone extract.
2. Recording of computer scans in RGB true colour mode of single leaves on living plants with subsequent colour classification and estimation of the areas of colour classes is a more exact method for recording necrosis and chlorosis as to appraise the areas in conventional form. With this method it is possible to observe time series without disturbance of inaccuracy of great estimation classes or missing reproduction of appraisal with small estimation classes.

bioindikation, plant vitality, chlorosis, necrosis, reflectance, spectrometry, chlorophyll, tobacco, Nicotiana tabacum BEL W 3

Bioindikation, Vitalität, Chlorosen, Nekrosen, Reflexionspektrometrie, Chlorophyllgehalt, Tabak, Nicotiana tabacum BEL W 3

1 Problemstellung

Die Diskussionen im Jahr 1995 zur Festlegung eines Ozon-Grenzwertes für die Sommersmogverordnung zeigten, daß es keine wissenschaftlichen Grundlagen für die Höhe der Grenzwerte gibt, die sich an möglichen Schädigungen von Organismen ausrichten. Eine solche Orientierung ist aber unbedingt notwendig, wenn ein Grenzwert zum Schutz von Organismen und Umweltzerstörung eingeführt werden soll. Deshalb sind sensitive Bioindikations-Verfahren erforderlich, an denen die Auswirkungen der Schadstoffe aufgezeigt werden können. Diese Bioindikations-Verfahren verlangen eine schonende und genaue Beobachtung des Auftretens und der Veränderung der Schäden, die mit nicht destruktiven Verfahren durchgeführt werden muß.

Zur Erfassung von Schäden besonders an Bioindikatorpflanzen durch O_3 und SO_2 werden Chlorosen (Gelbfärbungen oder Bleichflecken) und Nekrosen (abgestorbenes Pflanzengewebe) herangezogen (ARNDT & al. 1987, STEUBING & FANGMEIER 1992). Verfärbungen sind auf mangelnde Ausbildung oder den vorzeitigen Abbau von Pigmenten zurückzuführen und können durch die chemische Analyse des Pigmentgehaltes quantifiziert werden (SCHUBERT 1985, ARNDT & al. 1987, YODER & DALEY, 1989, PENUELAS & al. 1994). Dies erfordert eine Probenahme an der Pflanze und damit eine einschneidende Störung des Bioindikators. Dies kann vermieden werden, wenn spektrale Daten am lebenden Blatt erhoben werden.

Die Anteile nekrotischer und chlorotischer Blätter werden bisher in ihrer flächigen Ausdehnung geschätzt und in Form von Schadstufen angegeben (ARNDT & al. 1987, STEUBING & FANGMEIER 1992). Oftmals stehen die zu bonitierenden Schäden, insbesondere Nekrosen, im engen räumlichen Zusammenhang mit Chlorosen und lebendem Gewebe. Dadurch lassen sich ihre Flächenanteile nur schwer quantitativ schätzen. Gerade bei dem Einsetzen frühzeitiger Seneszenz, die sich durch eine stetige Vergilbung ausdrückt, können die Unterschiede zwischen den nur wenige Tage auseinanderliegenden Bonituren nicht genau genug eingestuft werden. Deshalb müssen die Verfahren zur Schadensbonitur objektiviert werden.

2 Erfassung der Chlorophyll-Gehalte durch Messung der spektralen Reflexion der Blätter

2.1 Allgemeines

Bei Bioindikationsuntersuchungen ist es oft notwendig, die Vitalität von Pflanzen in Zeitreihen zu beschreiben, ohne den Organismus durch Messungen zu stören oder gar zu zerstören. Deshalb sind nicht-destruktive Methoden von außerordentlicher Wichtigkeit. Eine solche Methode ist die Messung des Chlorophyllgehaltes mit Hilfe des Reflexionsspektrums der Blätter.

Die Interaktion elektromagnetischer Strahlung mit Pflanzenblättern (Reflexion, Transmission und Absorption) wird durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Blätter bestimmt. Dabei ist die Strahlungsabsorption auf komplizierte Änderungen im Elektronenstatus bestimmter Atome im sichtbaren Spektralbereich (u.a. Chlorophyll a und b, Carotinoide und andere assoziierte Pigmente) bzw. polyatomarer Moleküle (z. B. Wasser) im nahen und mittleren Infrarot, zurückzuführen. Diese Absorptionsprozesse sind im starken Maße wellenlängenabhängig. Die blattinterne Streuung der elektromagnetischen Strahlung ist auf Diskontinuitäten des Refraktionsindex innerhalb der Blätter zurückzuführen (WOOLEY 1971, GAUSMAN & al. 1974). Sie ist mehr oder weniger wellenlängenunabhängig, wie z. B. MAAS & DUNLAP (1989) sowie JACQUEMOUD & BARET (1990) zeigen konnten. In der Tat verlaufen Reflexions- und Transmissionsspektren von pigmentfreien Blättern zumindest im nahen Infrarot und im sichtbaren Spektralbereich annähernd flach. Damit bestimmt die interne Zellstruktur die Reflexion und Transmission im gesamten Spektrum, wobei dieses Phänomen jedoch lediglich in Bereichen niedriger Absorption (hauptsächlich im nahen Infrarot) zu Tage tritt. Neben der blattinternen Streuung zeigen Blätter eine gerichtete Oberflächenreflexion. Auch sie ist nach VANDERBILT & al. (1993) mehr oder weniger wellenlängenunabhängig.

2.2 Methoden

Die Messungen wurden an Tabakpflanzen (*Nicotiana tabacum* BEL W 3) durchgeführt. Die Tabakpflanzen wurden in einer Reinluftkammer aus Samen angezogen (Anzuchtbedingungen vgl. STEUBING & FANGMEIER 1992). Für die Registrierung von Nekrosen und Chlorosen wurden fünf Pflanzen nach 7-wöchiger Anzuchtdauer 6 Wochen lang im Freiland exponiert. Um für die Messungen der spektralen Reflexion der Tabakblätter eine hohe Variationsbreite an Chlorophyllgehalten zu erzeugen, wurden jeweils fünf 14 Wochen alte Pflanzen vierzehn Tage vor den

Messungen aus der Reinluftkammer entnommen und im Gewächshaus unter Zusatzbeleuchtung, besonders hoher N-Düngung und in einer Dunkelkammer gehalten. Der Chlorophyllgehalt wurde einerseits durch Reflexionsmessungen mit einem Field-Spec-Spektroradiometer (Hersteller: Analytical Spectral Devices Inc., USA) erfaßt und andererseits spektrophotometrisch im Acetonextrakt (vgl. KREEB 1990) gemessen.

Die Reflexionsmessungen an den einzelnen Tabakblättern wurden im Labor unter künstlicher Beleuchtung (durch mit Hilfe einer Halogenlampe) durchgeführt. Das Field-Spec-Spektroradiometer erfaßt bei einer spektralen Auflösung von 1 nm, die in das Sichtfeld des Radiometers reflektierte Strahlstärke zwischen 400 und 2500 nm. Bei einem Öffnungswinkel von 23° wurde in der verwendeten Messkonfiguration eine Blattfläche von zirka 3 cm² erfaßt. Die Reflexion wurde alternierend über einem dunklen und einem hellen Hintergrund gemessen und in 1 nm Schritten registriert. Die zwei unterschiedlich hellen Hintergründe erlauben es, ein von Störsignalen unbeeinflusstes Reflexionsspektrum von Blättern (Abb. 1) zu messen (MAJOR & al. 1993). Unter Berücksichtigung der spektralen Strahlstärke eines Spektral-Reflexionsstandards wurde aus der spektralen Strahlstärke die direktionelle Reflexion berechnet. Die aus den Meßdaten berechnete hemisphärische Reflexion entspricht der Reflexion, wie sie in einer integrierenden Sphäre gemessen würde, und ist weitgehend unabhängig von der Aufnahmegeometrie, wie auch eventueller Hintergrundeinflüsse.

Nach der von MAJOR & al. (1993) vorgeschlagenen Methodik berechnet sich die hemisphärische Reflexion (R) aus insgesamt vier direktionellen Reflexionsmessungen pro Blatt (auf den Wellenlängenindex wurde hier der Übersichtlichkeit halber verzichtet) wie folgt:

$$R = 2r_{inf} \frac{4r_{inf} - (1 + r_{inf})}{2r_{inf}(1 + r_{inf})^2 - (1 + r_{inf}^2)(1 + r_{inf})^2}$$

$$\text{mit: } r_{inf} = \frac{(r_{cb} \cdot r_w - r_{cw} \cdot r_b)}{(r_{cb} - r_{cw} + r_w - r_b)}$$

- r_{cb} spektrale direktionelle Reflexion der Probe über dunklem Hintergrund
- r_{cw} spektrale direktionelle Reflexion der Probe über hellem Hintergrund
- r_b spektrale direktionelle Reflexion des dunklen Hintergrundes
- r_w spektrale direktionelle Reflexion des hellen Hintergrundes

Alle im folgenden aufgeführten Überlegungen und Analysen beziehen sich auf diese hemisphärischen Reflexionswerte.

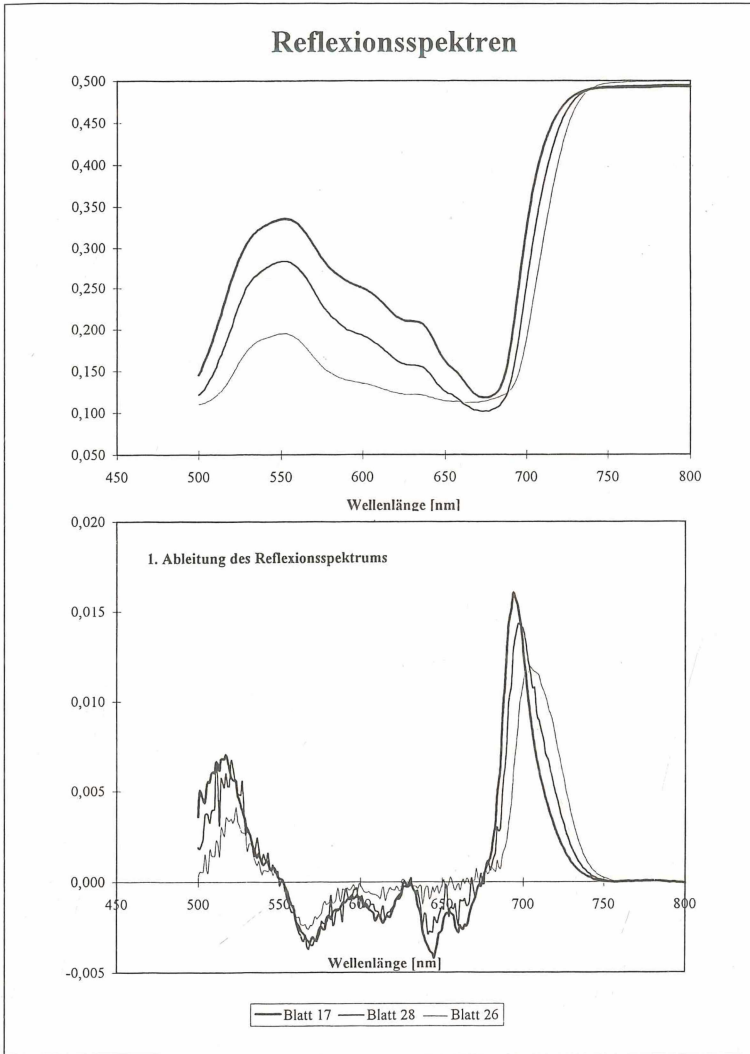


Abb. 1
Reflexionsspektren und deren 1. Ableitung dreier Tabakblätter mit unterschiedlichem Chlorophyll (a+b) Gehalten. (Blatt Nr. 17 mit $13.0 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$, Blatt Nr. 28 mit $22.6 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$ und Blatt Nr. 26 mit $38.7 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$) Die 1. Ableitung des Spektrums läßt sehr gut die Rotverschiebung der Reflexionsspektren bei zunehmenden Chlorophyllgehalt erkennen.

Fig. 1
Reflectance spectrum and their 1st derivation of three tobacco leaves with different chlorophyll content (leaf no. 17 with $13.0 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$, leaf no. 28 with $22.6 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$ and leaf no. 26 with $38.7 \mu\text{g Chl. (a+b) cm}^{-2}$). The 1st derivation of the reflectance spectrum illustrates the red shift of the spectrum with increasing chlorophyll content.

Die biochemische Chlorophyllbestimmung folgte der Beschreibung von KREEB (1990), die sich an die als allgemein gültig angesehenen Absorptionsbedingungen hält. Analysiert wurde der Chlorophyll(a+b)-Gehalt (Messung bei 663 und 646 nm im Acetonextrakt), der Wassergehalt (gravimetrisch) und die Blattfläche (Messung mit einem Leaf-Areameter der Fa. LICOR). Die Messungen wurden an den selben Blattabschnitten durchgeführt, die zuvor mit dem Feldspektroradiometer vermessen worden sind.

Als statistische Maße zwischen den spektralen Reflexionswerten und dem Chlorophyllgehalt werden Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten und deren Bestimmtheitsmaße (r^2) berechnet (SACHS 1992). Als Streuungsmaß der Korrelationskoeffizienten wird der 'root mean square error' (Wurzel der mittleren

Abweichungsquadrate) angegeben (GOTTWALD & al. 1986).

2.3 Ergebnisse

Die Reflexionswerte bestimmter Wellenlängen korrelieren sehr gut mit dem im Aceton-Extrakt bei 663 und 646 nm am Labor-Spektrometer gemessenen Chlorophyll a- und b-Gehalten. Die höchsten Bestimmtheitsmaße werden bei Wellenlängen zwischen 520 und 560 nm sowie bei 700 bis 710 nm erreicht (Abb. 2). Der natürliche Logarithmus des Kehrwertes der Reflexion weist immer bessere Bestimmtheitsmaße auf, als die einfache Reflexion, da die Relation zwischen Chlorophyllgehalt und der spektralen Refle-

Abb. 2
Bestimmtheitsmaße der Korrelationen zwischen der Reflexion bzw. des Kehrwertes der Reflexion und dem Chlorophyll(a+b)-Gehalt bei Wellenlängen zwischen 500 und 750 nm.

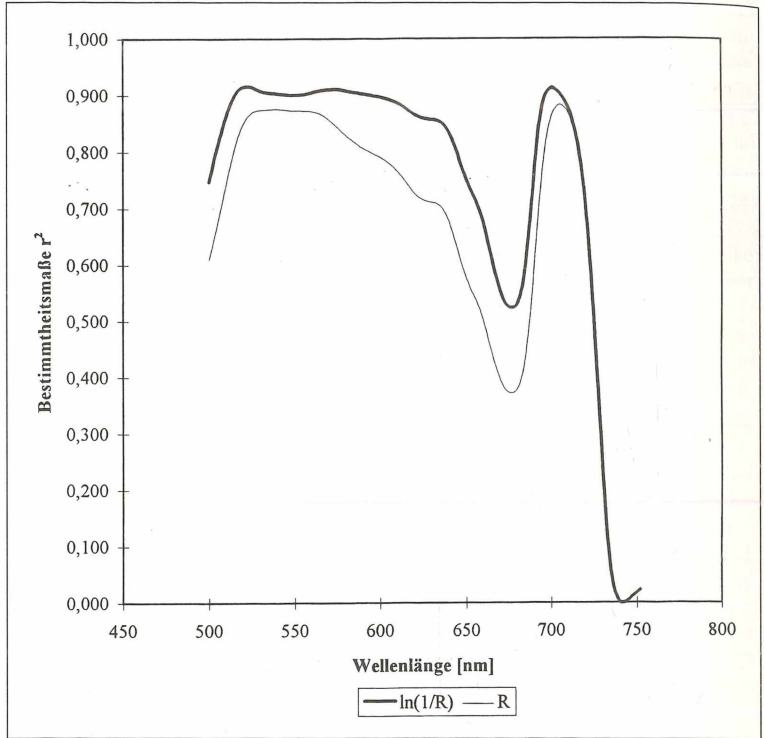


Fig. 2
Coefficients of determination (r^2) between reflectance, or inverse reflectance and chlorophyll content on wavelength between 500 and 750 nm.

xion leicht exponentiell ist. Es kann generell festgestellt werden, daß der Flächenbezug des Chlorophyllgehaltes bessere Beziehungen ergibt, als der Trockengewichtsbezug, da die Strahlungsinteraktion mehr durch die flächenbezogenen Gehalte bestimmt wird als durch die auf die Trockenmasse bezogenen Gehalte. Im folgenden werden daher nur noch die flächenbezogenen Daten analysiert.

Tabelle 1 zeigt die jeweils besten empirischen Korrelationen zwischen den untersuchten spektralen Reflexionsdaten (Reflexion, Logarithmus des Kehrwertes der Reflexion, lokale Ableitung der Reflexion, Wendepunkt in der Rot-nIR-Flanke sowie Wende-

punkt in der Blau-Grün-Flanke des Reflexionsspektrums) und dem Chlorophyll(a+b)-Gehalt (Cab).

Es wird deutlich, daß der Chlorophyll(a+b)-Gehalt aus der Korrelation der logarithmierten Kehrwerte der Reflexion bei 524 nm mit den Chlorophyllgehalten geschätzt werden kann (rmse-Fehler = 3,99, vgl. Tab. 1, Abb. 3 und 4). Immer noch brauchbare Abschätzungen ergeben sich aus der Korrelation der Reflexionswerte von 704 nm mit den Chlorophyllgehalten (rmse-Fehler = 4,62). Diese Beziehung ist damit aber schon deutlich schlechter als das beste Ergebnis unter Verwendung der logarithmierten Reflexionswerte. Nur mäßig gut korrelieren die Wende-

Tab. 1
Bestimmtheitsmaße (r^2) Pearson'scher Korrelationskoeffizienten ($n=38$) und Streuungsmaße (rmse – root mean square error) zwischen dem Blattchlorophyllgehalt (bezogen auf die Fläche) und verschiedenen radiometrischen Größen (r = Reflexion; A = lokale Ableitung; $\lambda_{i_{rot}}$ = Wendepunkt in der Rot-nIR-Flanke; $\lambda_{i_{blau}}$ = Wendepunkt in der Blau-Grün-Flanke des Reflexionsspektrums).

Table 1
Coefficients of determination ($n=38$) and their root mean square error (rmse) of leaf chlorophyll content (related to leaf area) and different radiometric parameters (r = reflectance, A = local derivation, $\lambda_{i_{rot}}$ = point of inflexion in red-nIR edge; $\lambda_{i_{blau}}$ = point of inflexion in the blue-green edge).

| | $r(704)$ | $\log(1/r524)$ | $A(719.5)$ | $\lambda_{i_{rot}}$ | $\lambda_{i_{blau}}$ |
|-------|----------|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| r^2 | 0,882 | 0,916 | 0,851 | 0,847 | 0,711 |
| rmse | 4,62 | 3,99 | 5,67 | 5,51 | 7,60 |

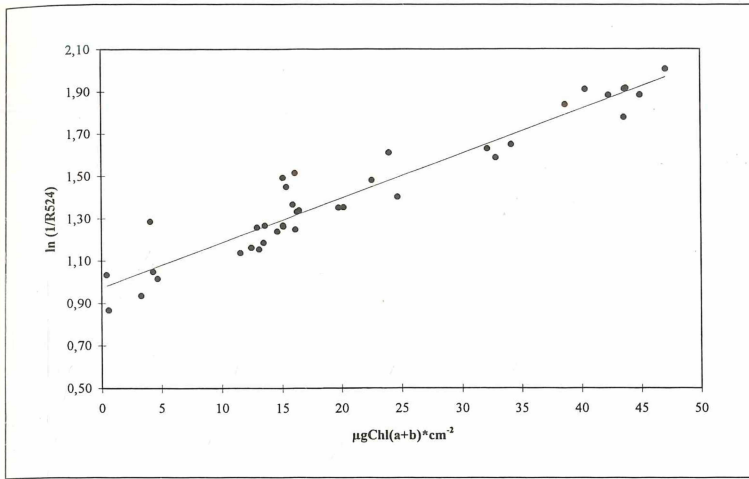


Abb. 3
Regression zwischen dem Chlorophyllgehalt [$\mu\text{gChl}(a+b)\text{ cm}^{-2}$] und dem natürlichen Logarithmus des Kehrwertes der Reflexion bei $\lambda = 524\text{ nm}$ mit dem höchsten Korrelationskoeffizienten aller Wellenlängen.

Fig. 3
Regression of chlorophyll content [$\mu\text{gChl}(a+b)\text{ cm}^{-2}$] and the natural logarithm of inverse reflectance by $\lambda = 524\text{ nm}$ with the best correlation coefficient of allwavelengths.

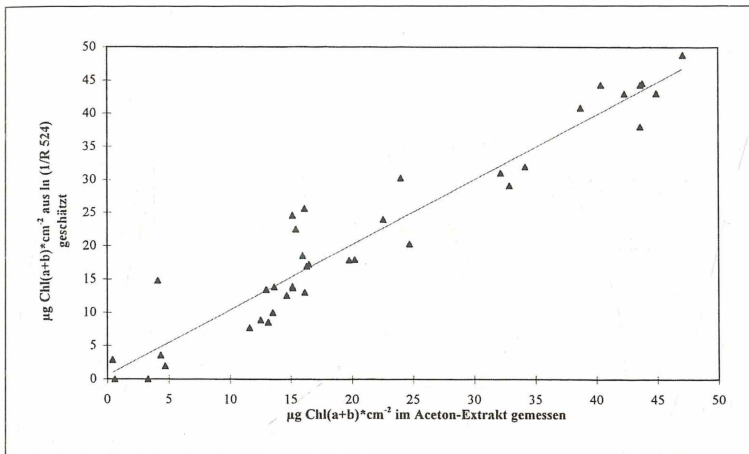


Abb. 4
Regression zwischen dem im Acetonextrakt gemessenen Chlorophyllgehalt [$\mu\text{gChl}(a+b)\text{ cm}^{-2}$] und dem aus dem natürlichen Logarithmus des Kehrwertes der Reflexion bei $\lambda = 524\text{ nm}$ geschätzten Chlorophyllgehalt.

Fig. 4
Regression of chlorophyll content in acetone extract [$\mu\text{gChl}(a+b)\text{ cm}^{-2}$] and chlorophyll content estimated from the natural logarithm of inverse reflectance by $\lambda = 524\text{ nm}$.

punkte des Spektrums in der Rot-nIR-Flanke (λ_{rot}) mit den Chlorophyllgehalten. Ungeeignet erscheinen dagegen die Wendepunkte in der Blau-Grün-Flanke (λ_{blau}) wie auch die lokalen Ableitungen. Es ist nicht klar, inwiefern sich diese Korrelationen noch durch die Verwendung geglätteter Daten steigern ließen. Vermutlich lassen sich die Schätzungen der Chlorophyll(a+b)-Gehalte durch die Bildung von Verhältnissen bestimmter Wellenlängen noch verbessern.

Erste Versuche zur Abschätzung des Blattwasserghaltes durch Reflexionsspektren ergaben im Vergleich zum Chlorophyllgehalt, daß die Bestimmtheitsmaße deutlich niedriger liegen. So liegt der r^2 im Falle des Chlorophylls im besten Fall bei 0,916 dagegen beim Blattwasser nur bei 0,65. Eventuell ist dies darauf zurückzuführen, daß die Variabilität im Blattwassergehalt der verschiedenen Proben nicht groß genug war.

3 Bitmaps von Blättern an lebenden Pflanzen und Flächenberechnung der Nekrosen und Chlorosen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung

3.1 Allgemeines

Die flächigen Ausdehnungen nekrotischer und chlorotischer Blattbereiche werden bisher in Form von Schadstufen geschätzt. Der Mangel dieser Schätzmethoden liegt bei engen Klassengrenzen in ihrer schlechten Reproduzierbarkeit aber ausreichenden Genauigkeit und bei weiten Klassengrenzen in ihrer geringen Genauigkeit aber hinreichenden Reproduzierbarkeit. Für genaue und reproduzierbare Angaben, wie z. B. bei der Untersuchung von Zeitreihen oder fein verzahnten räumlichen Nebeneinander von nekrotischen, chlorotischen und gesunden Bereichen, ist es oft besser, sie durch andere Methoden zu ersetzen.

3.2 Prinzip der Methode:

Ein lebendes Blatt wird auf die Unterlage gelegt, mit einer durchsichtigen Folie (Overheadfolie) überdeckt und mit dem Handscanner abgefahren (Dauer dieses Vorgangs ca. 10–30 sec., je nach Größe des Blattes). Die Auflösung des Bildes wurde auf 100 dpi (Dots per inch) festgelegt, höhere Auflösungen ergeben in Relation zum Genauigkeitsergebnis zu große Dateien, die eine Verlangsamung des gesamten Verarbeitungsprozesses nach sich ziehen. Der Rechner erstellt ein File im TIFF oder Bitmap Format (RGB-True color, 24 Bit). Ein solches Bild ist in Abbildung 5 (links) ausgedruckt. Dunkle Flecken sind nekrotische Bereiche. Sie stammen von einer länger zurückliegenden Ozon-episode, helle, weiße Flecken von einem nur wenige

Tage zurückliegendem Ozoneinfluß. Zudem weist das Blatt oben links eine unspezifische Vergilbung (Chlorose) auf, die in der Graustufen-darstellung nur schlecht zu erkennen ist.. Die dunklen Schatten im unteren Bereich sind auf Unebenheiten des Tabakblattes zurückzuführen.

Zur Auswertung wird das Bild mit dem Program IMAGINE (Hersteller: ERDAS Inc., USA) weiterverarbeitet, indem eine überwachte Klassifikation durchgeführt wird. Hierbei werden je fünf Polygone in typische chlorotische, nekrotische, gesunde grüne Bereiche des Blattes und in den Hintergrund des Bildes gelegt. Das Programm ordnet die übrigen Flächen nach der Ähnlichkeit der Farbzusammensetzung diesen Klassen zu (Abb. 5 rechts). Im Vergleich zur linken Abbildungshälfte sind die nekrotischen Bereiche

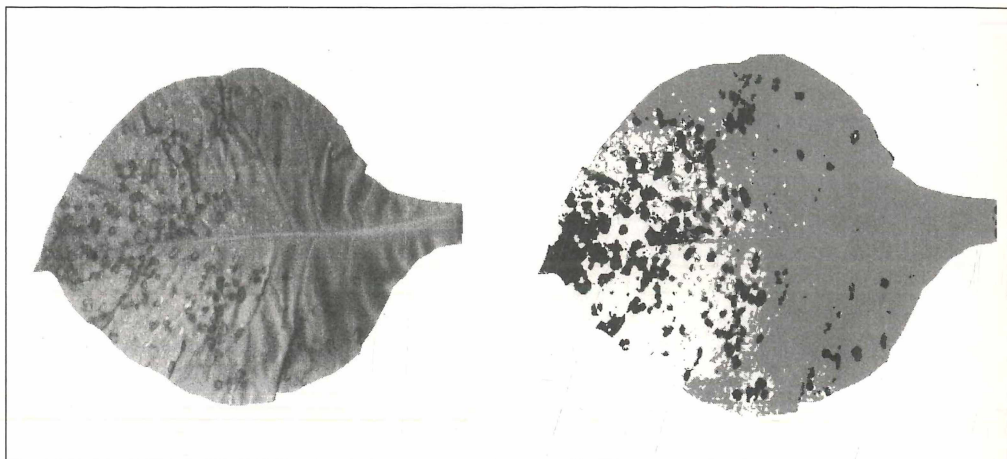


Abb. 5
links: Graustufen-Ausdruck eines mit einem Handscanner eingescannten Tabakblattes (*Nicotiana tabacum* BEL W 3) mit Ozonschäden (Erläuterungen s. Text).
rechts: Ergebnis der Farbklassifikation (Erläuterungen s. Text).

Fig. 5
left: Gray scale print of a scanned tobacco leaf (*Nicotiana tabacum* BEL W 3) with ozone injuries (for explanations see text).
right: Result of the colour classification (for explanations see text).

Tab. 2
Klassifikation der Blattschäden des Tabakblattes (vgl. Abb. 5) und Flächengrößen der errechneten Farbklassen.

| Farbklassen | Anzahl der Pixel | Fläche [cm ²] bei 100 dpi | % der Blattfläche | Bezeichnung |
|-------------|------------------|---------------------------------------|-------------------|---|
| mittelgrau | 72 769 | 46,95 | 61,73 | grünes, gesundes Gewebe |
| hellgrau | 20 212 | 13,04 | 17,15 | Chlorosen, unspezifische Vergilbung |
| weiß | 4 784 | 3,09 | 4,06 | Bleichflecken vom jüngsten Ozon-Einfluß |
| dunkelgrau | 20 122 | 12,98 | 1,06 | Nekrosen von zurückliegendem Ozon-Einfluß |
| Summe | 117 887 | 76,06 | 100,00 | gesamte Blattfläche |

Table 2
Classification of tobacco leaf injuries (s. Fig. 5) and area proportions of colour classes.

schwarz, die chlorotischen Bereiche hellgrau, die Bleichflecken weiß und die ungeschädigten Blattbereiche dunkelgrau dargestellt.

Aufgrund der farblich klassifizierten Bildpunkte läßt sich dann eine relative Flächenzuordnung und bei Kenntnis der Größe des Bildes auch die absoluten Flächen angeben (Tab. 2).

4 Schlußfolgerungen

Die dargestellten Verfahren eignen sich zur Charakterisierung der Vitalität von Pflanzen. Mit ihnen läßt sich ein Schädigungsverlauf objektiv und reproduzierbar registrieren, ohne dass die beobachteten Pflanzen durch Probenahme geschädigt werden. Beide Methoden sind im Freiland einsetzbar.

Die Chlorophyll-Konzentration wird von vielen Autoren empirisch durch die Blatt-Reflexion im Absorptionsmaxima des Chlorophylls bei 675 nm bestimmt (BENEDICT & SWIDLER 1961; HARDWICK & BAKER 1973; WALLIHAN 1973; MACNICOL & al. 1976). Im Gegensatz dazu schlagen u.a. THOMAS & GAUSMAN (1977) die Analyse der Blatt-Reflexion bei 550 nm vor. Dadurch umgehen sie die durch die niedrige Reflexion bei 675 nm bedingte, relativ starke Streuung. Diese augenscheinliche Unstimmigkeit konnte durch Simulationen von JACQUEMOUD & BARET (1990) geklärt werden. Danach bietet es sich an, bei sehr geringen Chlorophyll-Konzentrationen im Bereich des Absorptionsmaximas (675 nm) zu arbeiten, dagegen bei mittleren bis hohen Konzentrationen im Bereich um 550 nm. In Form von hochaufgelösten Korrelationspektren konnten YODER & PETTIGREW-CROSBY (1995) zeigen, daß sich neben dem 550 nm Bereich auch noch der Spektralbereich um 730 nm gut zur Chlorophyll-Bestimmung eignet. Neben den monospektralen empirischen Korrelationen können auch mehrere Wellenlängen gleichzeitig eingesetzt werden. CHAPPELLE & al. (1992) z. B. benutzten Verhältnisse der Reflexion zweier Wellenlängen zur Chlorophyll-Bestimmung. BARET & al. (1992) sowie FILELLA & PENUELAS (1994) korrelierten den Chlorophyll-Gehalt mit der Position und Form der Rot-Flanke. Noch besser als die absoluten Reflexionswerte korrelierten in der Studie von YODER & PETTIGREW-CROSBY (1995) die ersten Ableitungen der ($\log 1/\text{Reflexion}$) mit dem Chlorophyll-Gehalt. Als besonders günstig erwiesen sich dabei die Wellenlängenbereiche von 524, 620, 690 und 750 nm. Durch die Messung der Reflexionsspektren im Bereich des von 900 bis 2500 nm lassen sich auch weitere Aussagen zum Wassergehalt sowie Angaben über die Zellstruktur der Blätter ableiten.

Die vorliegenden Untersuchungen und der Vergleich mit vorhandener Literatur ergeben, daß die empirischen Beziehungen zwischen der Reflexion und dem Chlorophyllgehalt für viele Pflanzenarten

und Entwicklungszustände dieser Arten neu hergeleitet werden müssen, weil die spektralen Reflexionsmessungen in großem Maße von der Blattstruktur (Blattoberfläche, Blattdicke) beeinflusst werden. Die Blattstruktur ist jedoch von Art zu Art und in verschiedenen Entwicklungsstadien so unterschiedlich, daß sich kein Patentrezept für alle Meßobjekte zur genauen Abschätzung des Chlorophyllgehaltes aus Reflexionswerte bestimmter Wellenlängen angeben läßt. Verhältnisbildung der Reflexionsdaten zweier Wellenlängen ergeben vielleicht noch sicherere Abschätzungen, als die Verwendung logarithmierter Kehrwerte der Reflexion einzelner Wellenlängen.

Durch die Aufnahme und Auswertung von Bitmaps der Blätter wird eine genauere Angabe der Blattflächen und geschädigten Teile der Blätter möglich, als das mit bisher angewendeten Schätzverfahren möglich ist. Die Auswertung ist jedoch noch nicht so automatisiert, daß es sich lohnt, das Verfahren routinemäßig einzusetzen. Es eignet sich jedoch besser als Fotografien zur objektiven Dokumentation von Schadensverläufen an ausgesuchten Beispielen.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden an der Universität Trier durchgeführt. Unser Dank gilt Herrn Prof. Dr. J. Hill für die Überlassung des Spektroradiometers und Frau Prof. Dr. B. Ruthsatz für die Nutzung des Gewächshauses und die Nutzung des Geobotanischen Laboratoriums. Frau Dorothea Krieger danken wir für die Durchführung der Chlorophyllbestimmungen.

Literatur

- ARNDT, U., NOBEL, W. & B. SCHWEIZER, 1987: Bioindikatoren, Möglichkeiten, Grenzen und neue Erkenntnisse. – Ulmer Verlag, Stuttgart, 388 S.
- BENEDICT, H. M. & R. SWIDLER, 1961: Non-destructive method for estimating chlorophyll content of leaves. – *Science* 133: 2015–2016.
- CHAPPELLE, E. W., MOON, S. K., & J. E. McMURTEY III, 1992: Ratio analysis of reflectance spectra (RARS). An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotinoids in soybean leaves. – *Remote Sensing of Environment* 39: 239–243.
- FILELLA, I. & J. PENUELAS, 1994: The red-edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. – *Int. J. Remote Sensing* 15: 1459–1470.
- GAUSMAN, H. W., ALLEN, W. A. & D. C. ESCOBAR, 1974: Refractive index of plant cell walls. – *Applied Optics* 13: 109–111.

- GOTTWALD, S., KÜSTER, H., HELLWICH, M. & H. KÄSTNER, 1986: Handbuch der Mathematik, Verlag Deutsch, Frankfurt a.M., 704 S.
- HARDWICK, K. & N. R. BAKER, 1973: In vivo measurement of chlorophyll content of leaves. – *New Phytol.* 72: 51–54.
- KREBB, K. H., 1990: Methoden zur Pflanzenökologie und Bioindikation. G. Fischer Verlag Stuttgart, 327 S..
- JACQUEMOUD, S. & F. BARET, 1990: PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. – *Remote Sensing of Environment* 34: 75–91.
- MAAS, S. J. & J. R. DUNLAP, 1989: Reflectance, transmittance, and absorptance of light by normal, etiolated, and albino corn leaves. – *Agronomy Journal* 81: 105–111.
- MACNICOL, P. K., DUDZINSKI, M. L. & B. N. CONDON, 1976: Estimation of chlorophyll in tobacco leaves by direct photometry. – *Ann. Bot.* 40: 143–152.
- MAJOR, D. J., MCGINN, S. M., GILLESPIE, T. J. & F. BARET, 1993: Technique for determination of single leaf reflectance and transmittance in field studies. – *Remote sensing of environment* 43: 209–215.
- PENUELAS, J., GAMON, J., FREEDEN, A., MERINO, J. & C. FIELD, 1994: Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. – *Remote Sensing of Environment* 48: 135–146.
- SACHS, L., 1992: *Angewandte Statistik* – 7. Aufl. Springer Verlag New York, Berlin, 846 S.
- STEUBING, L. & A. FANGMEIER, 1992: *Pflanzenökologisches Praktikum*. Ulmer, Verlag Stuttgart UTB, 205 S.
- SCHUBERT, R. [HRSG.], 1985: *Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen*. G-Fischer Verlag, Stuttgart, 327 S.
- THOMAS, J. R. & H.W. GAUSMAN, 1977: Leaf reflectance versus leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops. – *Agronomy Journal* 69: 799–802.
- VANDERBILT, V. C., RONDEAUX, G. & F. BARET, 1993: Polarization of light by vegetation. – In: VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME & SINOQUET (ed.): *Crop structure and light microclimate: characterizations and applications*, Paris, INRA-Editions, 63–76.
- YODER, B. J. & L. S. DALEY, 1989: Development of a visible spectroscopic method for determining chlorophyll a and b in vivo in leaf samples. – *Spectroscopy* 5: 44–50.
- YODER, B. J. & R. E. PETTIGREW-CROSBY, 1995: Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales. – *Remote Sensing of Environment* 53: 99–211.
- WALLIHAN, E. F., 1973: Portable reflectance meter for estimating chlorophyll concentrations in leaves. – *Agronomy Journal* 65: 659–662.
- WOOLEY, J. T., 1971: Reflectance and transmittance of light by leaves. – *Plant Physiol.* 47: 656–662.

Adresse

PD.Dr. rer. nat. habil. Willy Werner
 Universität Trier
 Fachbereich VI/Geobotanik
 Dipl. Geogr. Clement Atzberger
 Universität Trier
 Fachbereich VI/ Fernerkundung
 D-54286 Trier

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1996

Band/Volume: [27_1996](#)

Autor(en)/Author(s): Werner Willy, Atzberger Clement

Artikel/Article: [Reflexionsspektren und Computer-Bitmaps zur Erfassung und Quantifizierung von Chlorosen und Nekrosen an Blättern 341-348](#)