

A. Kadro und G. Hildebrandt
 Abt. Luftbildmessung und Luftbildinterpretation
 Universität Freiburg Bundesrepublik Deutschland

BEOBACHTUNGEN ÜBER DAS SPEKTRALE REFLEXIONSVERHALTEN
 VON KIEFERN- UND FICHTENBESTÄNDEN

Zusammenfassung

Bei spektroradiometrischen in-situ-Messungen an Beständen von *Pinus silvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pini* und *Picea abies* wurde im Spektralbereich $\lambda = 400 - 1100 \text{ nm}$ zum Teil unterschiedliches Reflexionsverhalten der Bäume dieser Arten festgestellt. Über die Meßergebnisse wird berichtet und eine Erklärung des unterschiedlichen Verhaltens aufgrund der Richtungsabhängigkeit der Reflexion und morphologischer Eigenarten der Baumarten zu geben versucht.

Einleitung

Als weiteren Beitrag zur Erforschung des spektralen Reflexionsverhaltens von Vegetationsbeständen werden Ergebnisse von in-situ-Messungen der Reflexion verschiedener Waldbestände vorgestellt. Im Gegensatz zu in-situ-Messungen landwirtschaftlicher Kulturen und zu Labormessungen an Blättern oder Nadeln von Bäumen gehören in-situ-Messungen von Waldbeständen noch immer zu den Seltenheiten. Es bereitet einige technische Schwierigkeiten die Meßeinrichtungen in genügender Höhe über den Baumkronen eines Waldbestandes zu plazieren.

Im vorliegenden Falle wurden Messungen mit einem EG + G Spektroradiometer von der Spitze eines 18 m hohen, schwenkbaren Mastes aus durchgeführt. Der Öffnungswinkel des Radiometers betrug 10° . Gemessen wurde kontinuierlich über den Spektralbereich $\lambda = 400$ bis 1100 nm und vom gleichen Objekt zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der Reflexion in kürzesten zeitlichen Abständen jeweils aus verschiedenen Meßzenith (ϑ_r) und -azimuthrichtung (φ_r). Es wurde stets der spektrale, halbräumliche konische Reflexionsfaktor (R) berechnet:

$$R(\lambda) = \frac{L_{\lambda r}(\vartheta_r, \varphi_r, \varrho_r)}{L_{\lambda r, \omega L}}$$

$L_{\lambda r}(\vartheta_r, \varphi_r, \varrho_r)$: Vom Meßobjekt reflektierte spektrale Strahldichte

$L_{\lambda r, \omega L}$: vom weißen Lambert-Reflektor reflektierte spektrale Strahldichte (Äquivalent zur Globalstrahlung)

Zur ausführlichen Information über die Meßgeräte und ihre physikalisch-technischen Grundlagen wird auf Boehnel et al. (1978) verwiesen, die auch hier zusammen mit A. Kadro die Messungen durchführten.

Die untersuchten Waldobjekte

In die Untersuchung wurden fünf verschiedene junge, dicht geschlossene Nadelbaumbestände gleicher Altersklasse einbezogen. Baumart, Alter, Untersuchungsort und -daten sind in Tab. 1 zusammengefaßt.

Tab. 1

Baumart	Untersuchungsort	U'Datum	Messgerät	Wuchsklasse
1	2	3	4	5
Picea abies	Schwarzwald/Feldberg	26.8.1976	EG + G 585	Stangenholz
Picea abies	Schwarzwald/Feldberg	20.6.1977	EG + G 585	Stangenholz
Picea abies	Schwarzwald/Feldberg	12.10.1977	EG + G 585	Dickung
Picea abies	Schwarzwald/Feldberg	13.10.1978	EG + G 555	Dickung
Pinus silvestris	Rheintal/Hartheim	4.8.1977	EG + G 585	Dickung
Pinus nigra	Rheintal/Hartheim	7.9.1977	EG + G 585	Dickung
Pinus pini	Calabrien	20.8.1978	EG + G 555	Stangenholz

Die vom Spektroradiometer erfaßte Testfläche erfaßte jeweils vollständig geschlossene Teilstücke des Kronendaches. Bodensicht war nicht vorhanden. Der gemessene Ausschnitt des Kronendaches zeigte in allen Fällen die für Waldbestände dieser Art typische, vertikal stark gegliederte, rauhe Oberfläche. Unterschiedlicher, baumartentypischer Aufbau der Einzelkronen (Anordnung, Richtung und Neigung der Äste sowie Anordnung, Menge, Größe und morphologischer Aufbau der Nadeln) und damit auch verschiedenartige Schattenmuster ließen gewisse Unterschiede im Reflexionsverhalten erwarten.

Verlauf der Reflexionsfaktorkurven

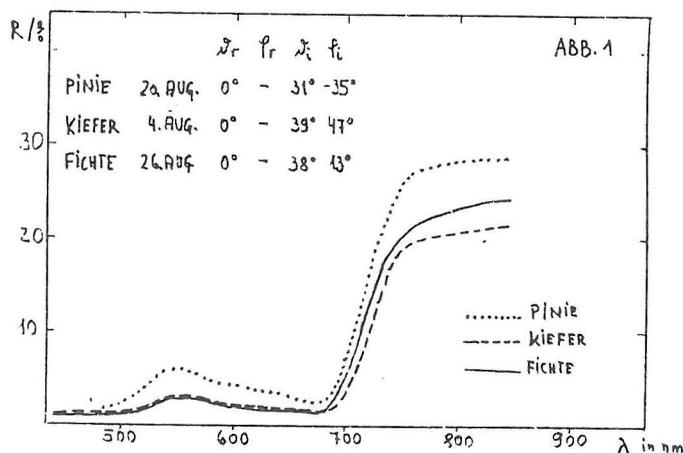
Die Ergebnisse zeigen zunächst erneut, daß das spektrale Reflexionsverhalten der Waldbestände prinzipielle Ähnlichkeit sowohl mit anderen grünen Vegetationsbeständen, als auch mit den im Labor gemessenen Reflexionen grüner Blattorgane aufweist: Die Reflexionsfaktorkurve - $R\%$ über λ - zeigt innerhalb des sichtbaren Lichtbereichs das typische kleine Maximum bei $\lambda = 550$ nm, den steilen Anstieg der $R\%$ -Werte bei $\lambda = 700 - 750$ nm und im anschließenden nahen Infrarot ein Plateau mit schwacher Andeutung einer Wasserabsorptionsbande bei $\lambda = 962$ nm. Prinzipielle Unterschiede zwischen den Baumarten sind nicht zu beobachten. Auch bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln und Reflexionsrichtungen ist der Verlauf der Reflexionsfaktorkurve gleichartig.

Vergleich von $R\%$ -Werten der Nadeln und der Bestandesoberfläche

Bei senkrecht auf das Testobjekt gerichteten Messungen ($\vartheta_r = 0^\circ$) liegen die Reflexionsfaktoren sowohl im sichtbaren Lichtbereich als auch im nahen Infrarot bei den Fichten- und Kiefernbeständen deutlich unter jenen, die von Labormessungen an Nadeln dieser Baumarten bekannt sind. Für Fichtenbestände wurden z.B. durch die in-situ-Messungen für $\lambda = 550$ nm $R\%$ -Werte von 4,0 (im Juni) und 2,3-2,8 (im Oktober) und für $\lambda = 800$ nm von 21,6 - 21,9 (im Juni) und 12,3 - 14,3 (im Oktober) gemessen. Fichtennadeln und Fichtentriebe zeigen dagegen in Laboruntersuchungen von Bäckström und Welander (1953), Alekseev und Belov (1960), Arcibashev und Belov (1963), Wolff (1966) und Kharin (1973) $R\%$ -Werte bei $\lambda = 550$ nm zwischen 5 und 15 und bei $\lambda = 800$ nm zwischen 34 und 40. Dabei sind die bei den Labormessungen beobachteten Unterschiede in erster Linie auf das Alter der Nadeln bzw. Triebe, zu geringerem Teil auch auf die Herkunft (Standort, Baumteil) zurückzuführen. Die signifikanten Unterschiede zwischen den in-situ-Messungen und den Laboruntersuchungen bezüglich der Größe der Reflexionsfaktoren sind zu erklären durch die Einbeziehung von Schattenanteilen des Bestandeskronendaches bzw. der Einzelkrone und des Reflexionsanteils von Ast- und Stammteilen. Inwieweit die Unterschiede in der Anordnung und Lage der Nadeln am Baum und im Labormeßgerät im Verhältnis zur Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung während der Messung zur Erklärung der geringeren Reflexionsfaktoren beitragen, muß vorerst dahingestellt bleiben.

Vergleich der $R\%$ -Werte verschiedener Bestandesarten

Ein Vergleich der Reflexionsfaktoren der untersuchten Bestände ist nur insoweit sinnvoll als die Aufnahmezeitpunkte nahe beieinanderliegen, die Einstrahlungsbedingungen (ϑ_i und φ_i) ähneln und die Beobachtungsrichtung (ϑ_r, φ_r) gleich gewesen sind. In Abbildung 1 sind deshalb die aus Messungen senkrecht auf das Kronendach ($\vartheta_r = 0$) hervorgegangenen Reflexionsfaktorkurven $R\%$ über λ für nur drei der untersuchten Nadelholzbestände vergleichend dargestellt.



In der Abb. 1 zeigen sich für den Pinienbestand sowohl im sichtbaren Lichtbereich als auch im nahen Infrarot deutlich größere Reflexionsfaktoren als für den Kiefernbestand im Rheintal und den Fichtenbestand des Schwarzwaldes. Die Größe der Differenz legt es nahe hierin einen arttypischen Unterschied des Reflexionsverhaltens der ~~Pinie~~ gegenüber den mitteleuropäischen Kiefern und Fichten und nicht nur ein durch das zufällig erfaßte Meßfeld bedingten Unterschied zu sehen. Aus dem geringen Unterschied der Reflexionsfaktoren im nahen Infrarotbereich bei Kiefern und Fichte sollten dagegen noch keine Folgerungen dieser Art gezogen werden.

Die in Abb. 1 dargestellten Ergebnisse und die vielen ähnlichen Darstellungen von Reflexionsfaktorkurven, besonders wenn diese aus Labormessungen an Blattorganen hervorgegangen sind, werden freilich in ihrer Aussagefähigkeit relativiert wenn man die Richtungsabhängigkeit der Reflexion von Waldkronendächern und die dadurch bedingten Variationsmöglichkeiten der Reflexionsfaktorkurven ein und derselben Bestandesart in Betracht zieht. Waldbestände bilden aus der Menge nebeneinanderstehender Einzelbäume ein stark strukturiertes Kronendach. Die Rauigkeit des Kronendaches ist für die Reflexionsquantität sowie die Reflexionsrichtung von großer Bedeutung. Die Waldbestände gehören zu jenen Objekten, die die einfallende Sonnenstrahlung bevorzugt in einen Richtungsfächer, nämlich zurück in die Richtung der Einstrahlung reflektieren.

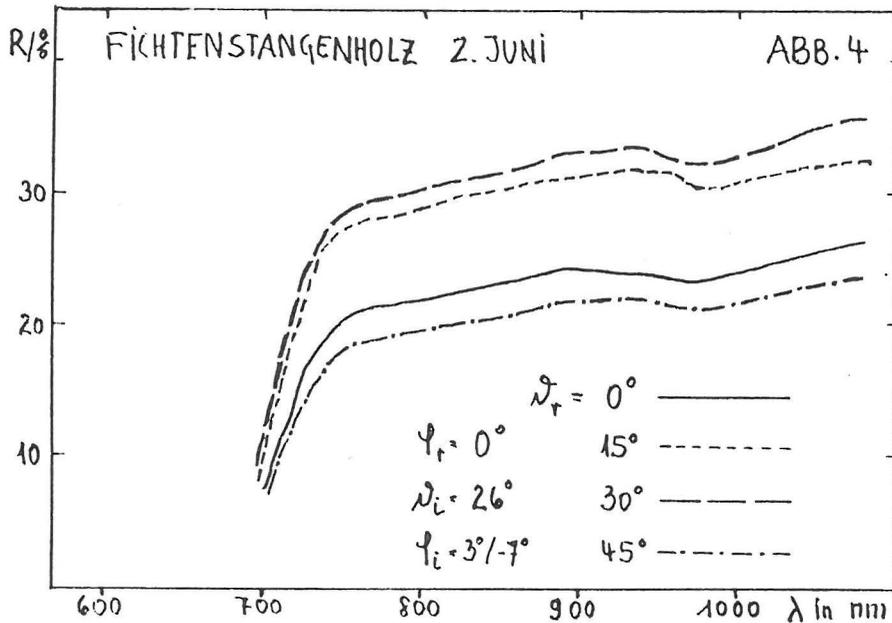
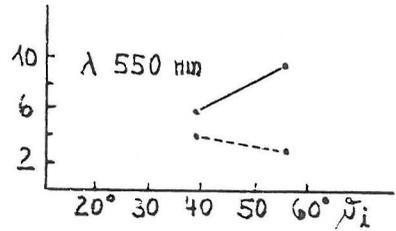
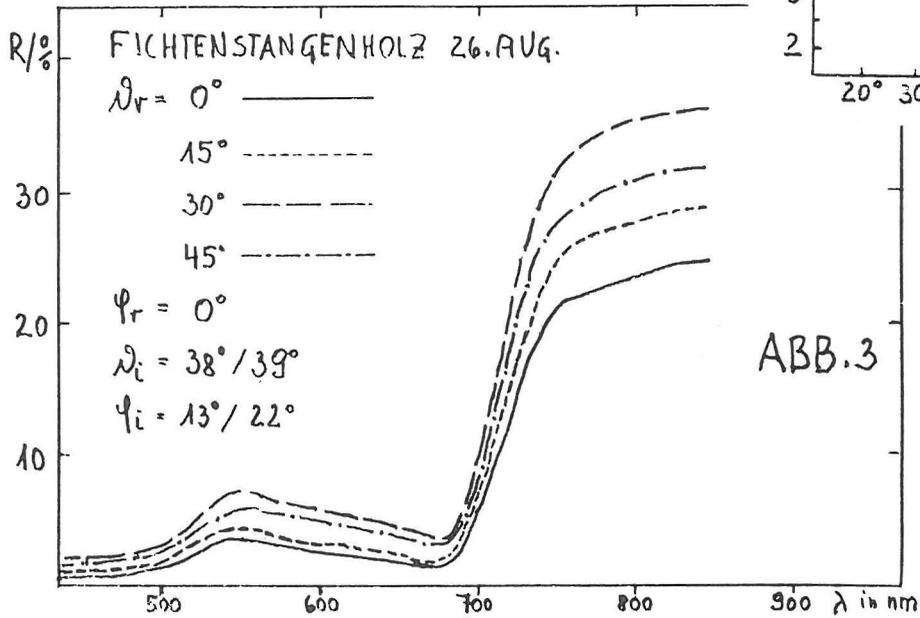
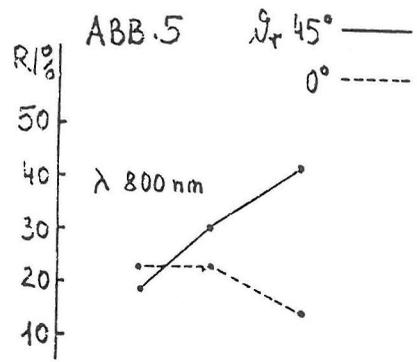
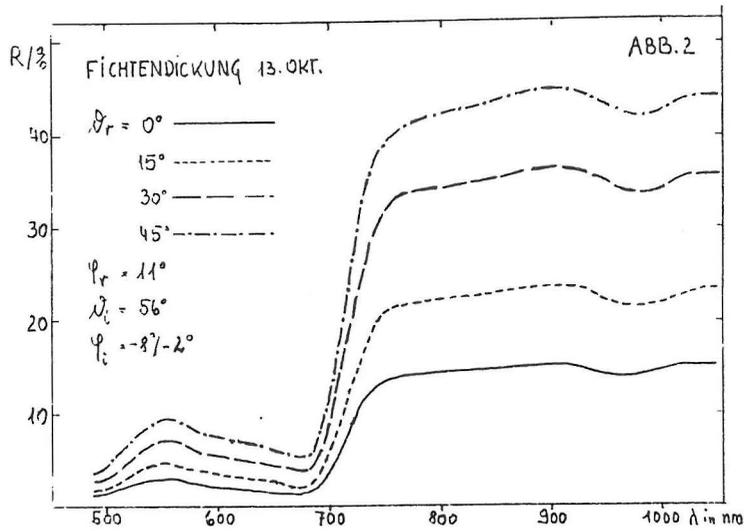
Die folgenden Ergebnisse belegen dies und versuchen auf die Frage nach typischen Verhalten der untersuchten Bestandesarten in Bezug auf die Art der Richtungsabhängigkeit eine Antwort zu geben.

Die spektrale Reflexion bei Messung in Mitlichtrichtung

Abb. 2-4 zeigen Reflexionsfaktorkurven von drei Fichtenbeständen die aus Messungen in Mitlichtrichtung bei ähnlichen Einstrahlungsbedingungen hervorgingen. Variiert wurde jedoch bei jeder Meßserie der Meßzenithwinkel α_r . Die Interpretation dieser Kurven führt zu drei bemerkenswerten Ergebnissen.

- zwischen $\alpha_r = 0^\circ$ und $\alpha_r = 30^\circ$ steigen die Reflexionsfaktoren über das gesamte, durch die Messungen jeweils erfaßte Spektrum
- bei großem α_r - hier im Falle der Messung vom 13.10.1978 mit einem $\alpha_r = 56^\circ$ - steigen die Reflexionsfaktoren über $\alpha_r = 30^\circ$ hinaus auch noch bis $\alpha_r = 45^\circ$ (vgl. Kadro 1978-1)
- die mit einem $\alpha_r = 45^\circ$, also relativ schräg, rückwärts gerichtete REFlexion steht in Beziehung zum α_i : Bei kleinem α_i liegen die Reflexionsfaktoren für $\alpha_r = 45^\circ$ unter jenen bei $\alpha_r = 0^\circ$. Mit größer werdenden α_i ergeben sich zunehmend größere R%-Werte für die mit $\alpha_r = 45^\circ$ rückwärts gerichtete Reflexion (Abb. 2 - 4 und Abb. 5).

Für die untersuchten Jungbestände verschiedener Kiefernarten läßt sich ein ähnlicher Vergleich nicht anstellen, doch zeichnet



sich in den Meßergebnissen ein prinzipiell gleichsinniges Reflexionsverhalten für die rückwärtsgerichtete Reflexion ab. Die Differenz der R_{β} -Werte bei Messungen mit unterschiedlichen α_r sind jedoch fast durchweg geringer als bei den Fichtenbeständen.

Bezüglich der gegen die Einstrahlungsquelle zurückgerichteten Reflexion ist das für die Fichtenbestände beschriebene Verhalten typisch für Waldbestände mit spitzkronigen Bäumen und dementsprechend rauhen, stark vertikal strukturierten Oberflächen.

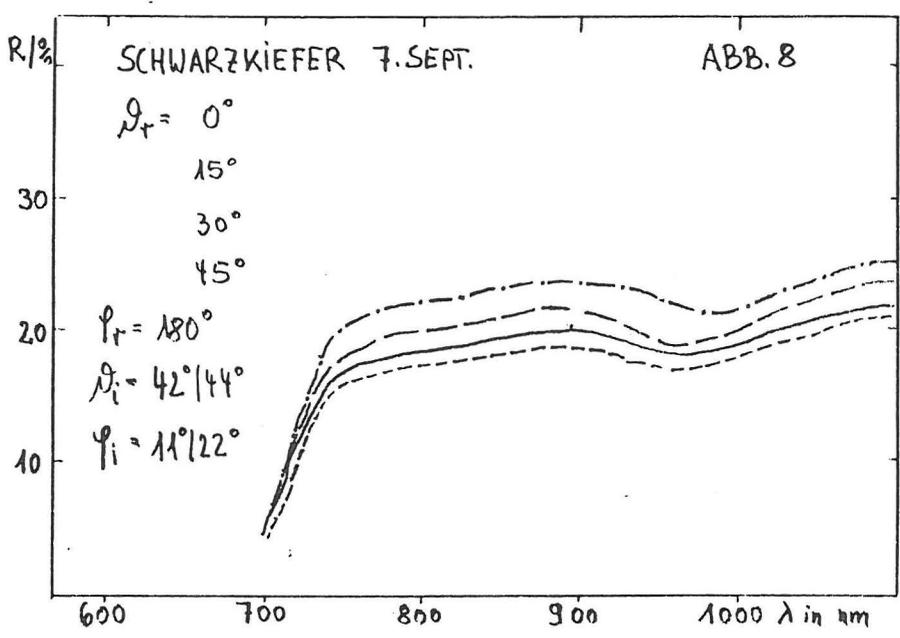
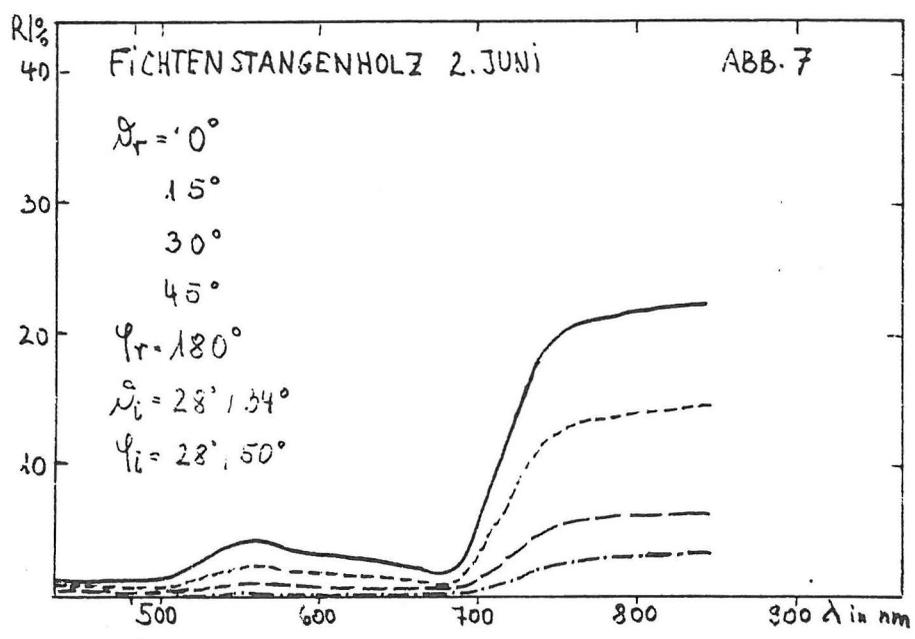
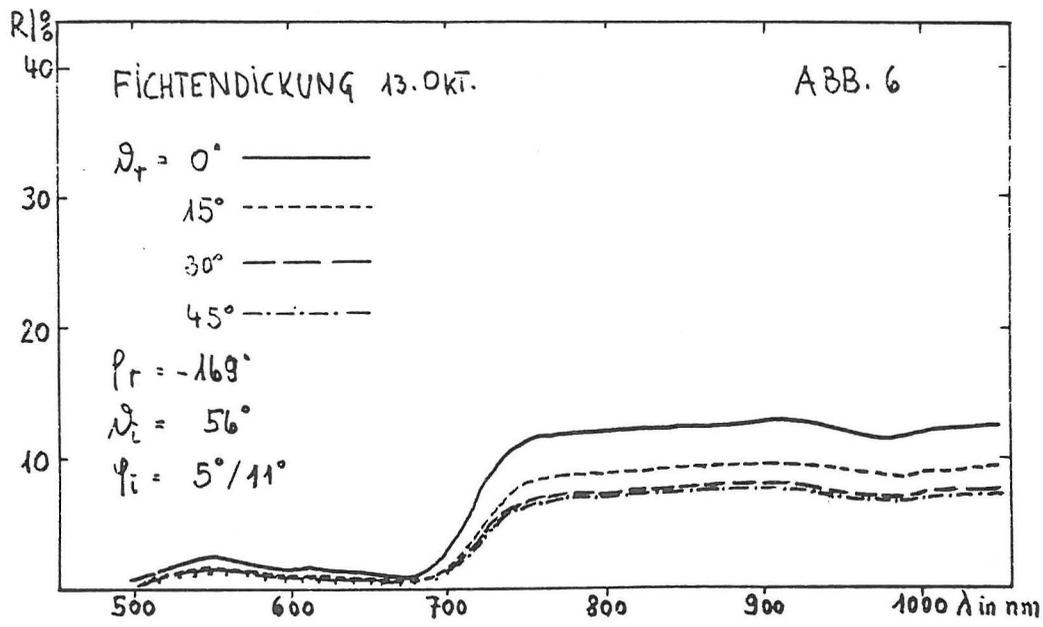
Die spektrale Reflexion bei Messungen gegen die Einstrahlungsrichtung

Messungen unter verschiedenen Beobachtungszenitwinkeln α_r wurden in den Untersuchungsbeständen auch gegen die Einstrahlungsrichtung durchgeführt. Durch sie wurde damit die vorwärtsgerichtete Reflexion erfaßt. Abb. 6 zeigt die Reflexionsfaktorkurven für die Fichtendickung: bei Messungen gegen die Einstrahlungsrichtung sinken die Reflexionsfaktoren in allen erfaßten Spektralbereichen mit Vergrößerung von α_r kontinuierlich ab. Insgesamt liegen die Reflexionsfaktoren deutlich niedriger als bei den Messungen in Mitlichtrichtung.

Das gleiche Bild ergibt sich für das am 20.6.1977 gemessene Fichtenstangenholz (Abb. 7). Auch hier sinken die Reflexionsfaktoren mit zunehmendem α_r kontinuierlich ab. Die Abnahme ist dabei sowohl im nahen Infrarot wie auch im sichtbaren Licht deutlicher als bei der Fichtendickung obwohl die Messungen in diesem Falle nicht streng gegen die Einstrahlungsrichtung vorgenommen werden konnten. Die Reflexionsfaktoren liegen im übrigen bei kleinem α_r im Stangenholz über und bei großem α_r gleich oder sogar noch unter jenem der Dickung.

Das Reflexionsverhalten des Kiefern- und Schwarzkiefernbestandes unterscheidet sich bei Messungen gegen die Einstrahlungsrichtung wesentlich von dem der Fichten. Beim Schwarzkiefern (Abb. 8) und auch beim Kiefernbestand sind die Reflexionsfaktoren im nahen Infrarot überraschenderweise auch bei der vorwärtsgerichteten Reflexion um so größer je größer α_r ist (vgl. auch Kadro 1978-2) Im sichtbaren Lichtbereich zeigten sich keine gesicherten Unterschiede. Bemerkenswert und für die Fernerkundung wichtig, ist die Beobachtung, daß sich Fichten einerseits sowie Schwarzkiefern und Kiefern andererseits zumindest im Dickungs- und Stangenholzalder neben den Unterschieden in der Winkelabhängigkeit der vorwärtsgerichteten Reflexion auch im Hinblick auf die Verhältnisse der Quantitäten der rückwärts- und vorwärtsgerichteten Reflexion unterscheiden:

- Die Fichtenbestände wiesen höhere Reflexionsfaktoren bei rückwärtsgerichteter Reflexion auf
- Der Schwarzkiefern- und der Kiefernbestand wiesen dagegen höhere Reflexionsfaktoren bei vorwärts gerichteter Reflexion auf.



Die spektrale Reflexion bei Messungen quer zur Einstrahlungsrichtung

Eine Serie von Messungen wurde in den Untersuchungsbeständen auch quer zur Einstrahlungsrichtung vorgenommen. Aus technischen Gründen war es dabei jedoch nicht möglich, jeweils gleiche $\Delta \varphi$ - Bedingungen einzuhalten. Dabei ist

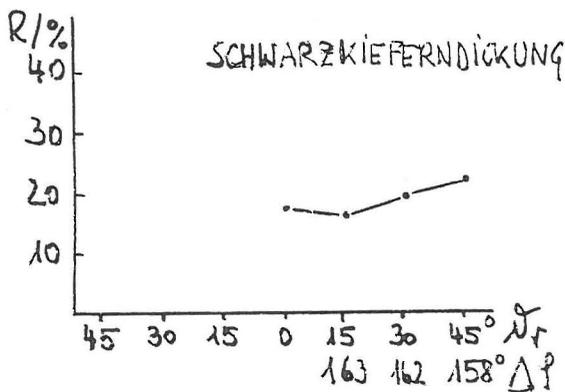
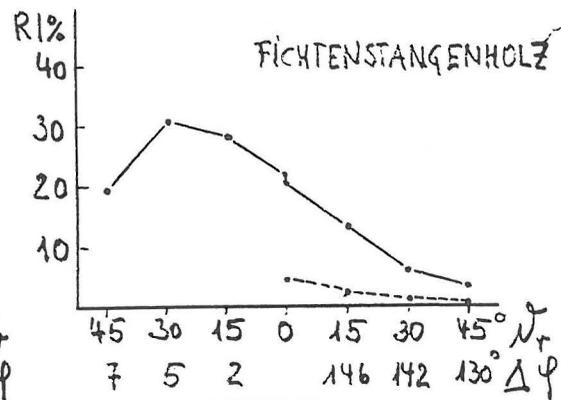
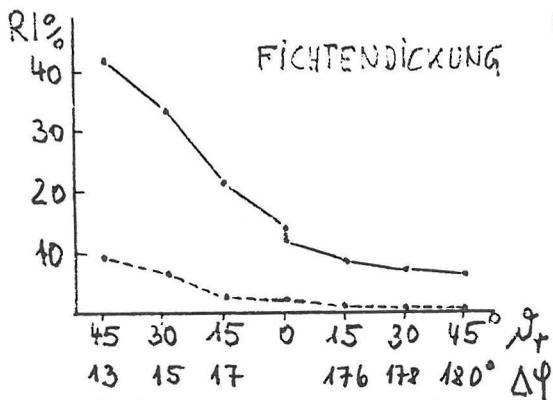
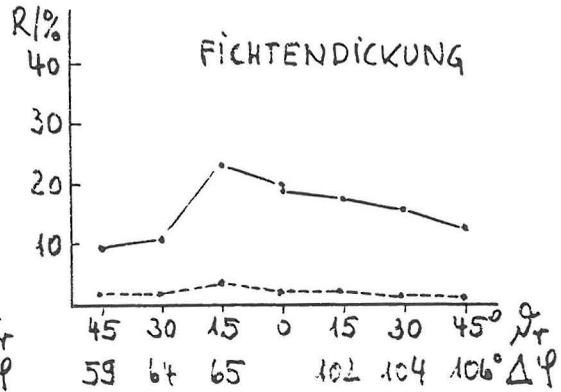
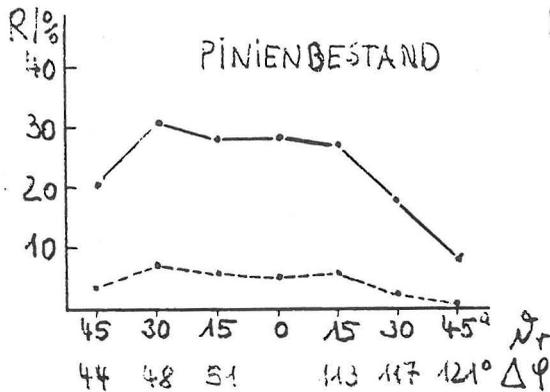
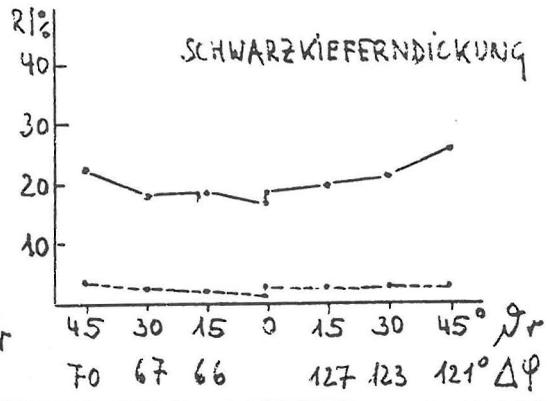
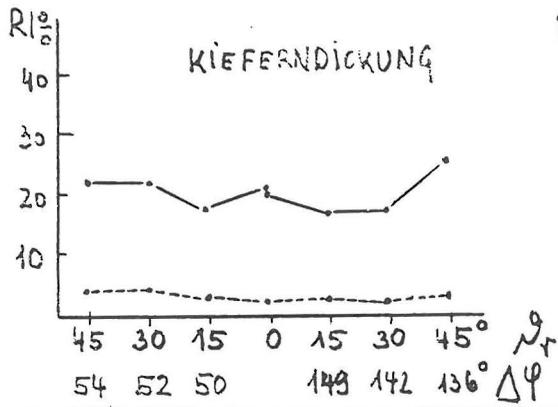
$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= |\varphi_r - \varphi_i| \quad \text{wenn} \quad |\varphi_r - \varphi_i| \leq 180^\circ && \text{und} \\ \Delta \varphi &= 360 - |\varphi_r - \varphi_i| \quad \text{wenn} \quad |\varphi_r - \varphi_i| > 180^\circ && \text{ist.} \end{aligned}$$

Dennoch geben die Meßergebnisse auch hier Hinweise auf unterschiedliches Reflexionsverhalten der Baumarten. Der Schwarzkiefern- und der Kiefernbestand verhalten sich ähnlich: Bei Messungen quer zur Einstrahlungsrichtung mit $\alpha_r = 45^\circ$ ergeben sich hohe bzw. die höchsten Reflexionsfaktoren; sie liegen über jenen die aus den Messungen mit $\alpha_r = 15^\circ$ und 30° hervorgingen. In der Fichtendickung und beim Pinienbestand weisen dagegen die Messungen mit $\alpha_r = 45^\circ$ die niedrigsten Reflexionsfaktoren auf. Hier ergeben die Messungen bei $\alpha_r = 15^\circ$ z.T. auch 30° die höheren Faktoren.

In Abb. 9 sind diese doch bemerkenswerten Unterschiede gut erkennbar. Zum Vergleich wurden in diesen Abbildungen auch die Ergebnisse recht streng mit und gegen die Einstrahlungsrichtung gerichteter Reflexionsmessungen beim Fichten- und Schwarzkiefernbestand mit aufgenommen.

Schlußbemerkung

Es ist sicher noch nicht möglich, das beobachtete Reflexionsverhalten und insbesondere die gefundenen z.T. unerwarteten und für die Fernerkundung bedeutsamen Unterschiede ursächlich zu erklären. Auch muß bezweifelt werden, ob ein vernünftiges Erklärungsmodell hierfür je gefunden werden kann. Es liegt aber nahe, Reflexionscharakteristiken der verschiedenartigen Bestandesformen auf die doch markanten Unterschiede im Sprossaufbau und der Nadelanordnung sowie der Benadelungsdichte zurückzuführen. Während die Größe der Reflexionsfaktoren in erster Linie bei jeweils bezüglich der Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung sowie der Jahreszeit vergleichbaren Messungen von den baumartentypischen Reflexionseigenschaften der Nadeln und vom Anteil der Schattenpartien beeinflusst wird, sind die Unterschiede der Richtungsabhängigkeit zweifellos vorwiegend auf die Neigungsrichtung der Nadeln bzw. die Verteilung dieser Neigungsrichtungen und die Dichte der Benadelung zurückzuführen.



— $R_{1/2}$ WERTE BEI $\lambda=800\text{nm}$

- - - $R_{1/2}$ WERTE BEI $\lambda=550\text{nm}$

$$|\varphi_r - \varphi_i| \leq 180^\circ : \Delta\varphi = |\varphi_r - \varphi_i|$$

$$|\varphi_r - \varphi_i| > 180^\circ : \Delta\varphi = 360 - |\varphi_r - \varphi_i|$$

ABB. 9

Zitierte Literatur

- Alekseev, V.A. und Belov, S.V.: Spektralnaja otrazhatelnaja sposobnost drevesnykh porod i drugikh obektov. aerofotosemki zapadnoj Ukrainy
Trudy Lab. Aeromet. 1960, 10, S. 105-122
- Arcybashev, E.S. und Belov, S.V. Otrazhatel'naja sposobnost, drevesnykh porod
Trudy Lab. Aeromet. 1958,6,S. 120-145
- Bäckström, H. und Welander, E.: En undersökning av remissionsformagån hos blad och barr av olika trädslag.
Norrlands Skogsvårdsförbunds Tidskrift 1953
S. 141-169
- Boehnel, H.J., Fischer, W., Knoll G. Spectral Field Measurements for the Determination of Reflectance Characteristics of Vegetated Surfaces.
Proc. Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment. Vol I p. 579-590, Freiburg 1978
- Kadro, A.: Spektrale Reflexion land- und forstwirtschaftlicher Kulturen während der Vegetationsperiode.
Forschungsbericht W 78-04 des BM für Forschung und Technologie, (1978 - 1)
- Kadro, A.: Spektrale Reflexionseigenschaften von Vegetationsbeständen während der Wachstumsperiode.
Proc. Int. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment. Vol I p. 761-770, Freiburg (1978 - 2)
- Kharin, N.G.: Spectral Reflectance Characteristics of the U.S.S.R. Main Tree Species.
Proceed. Symposium of IUFRO S 6,05 Freiburg 1973 S. 1-20
- Wolff, G.: Schwarz-weiße und falschfarbige Luftbilder als diagnostische Hilfsmittel für operative Arbeiten beim Forstschutz.
Actes du IIe Symp. Int. de Photointerpretation Paris 1966.