

**Quantifizierung des spektralen Angebotes photosynthetisch
aktiver Strahlung (PAR) innerhalb eines Fichten- Buchen-
Mischbestandes**

-

**Entwicklung und Aufbau eines Vielkanalmesssystems
zur Erfassung des Sonnenspektrums im Wellenlängenbereich
von 400 nm bis 850 nm**

Dissertation
der
Forstwissenschaftlichen Fakultät
der
Technischen Universität München

von

Heinrich Reitmayer
aus Teisendorf

Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung
der Technischen Universität München

Freising-Weihenstephan, 24. Juli 2000

1. Gutachter: Prof. Dr. P. Fabian
2. Gutachter: Prof. Dr. R. Matyssek

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Oktober 2000

Vorwort

Danken möchte ich *Herrn Prof. Dr. Peter Fabian* (Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Technische Universität München) für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit als experimentelle Arbeit am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung erstellen zu dürfen.

Einen besonderen Dank möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls aussprechen, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Hierbei sei besonders *Herr Dr. Herbert Werner* genannt, der viele hilfreiche Anregungen beisteuerte. Außerdem bedanke ich mich bei *Frau Dr. Annette Menzel*, die mir bei allen Forstangelegenheiten stets engagiert weiterhalf.

Für ihre hängenden Tätigkeiten an den Seilen danke ich *Herrn Dr. Gert Jakobi*, *Herrn Dipl.- Geogr. Christian Heerdt* und *Herrn Dipl.- Biol. Günther Spinnler* sehr herzlich, da sich ohne ihre Kletterkünste die Installation der Messsensoren in den Baumkronen als äußerst schwierig erwiesen hätte. Für die Hilfe und die Tipps bei der Entwicklung und Anfertigung der einzelnen Komponenten sowie für ihre unermüdlichen Tätigkeiten möchte ich den Technikern des Lehrstuhls, *Herrn Walter Hirner*, *Herrn Anton Knötig* und *Herrn Nikolaus Hofmann*, herzlichst danken. Vielen Dank auch an alle studentischen Hilfskräfte, die bei den Aufbauarbeiten und der zeitraubenden Konfektionierung der Lichtwellenleiter mitgeholfen haben.

Mein spezieller Dank gilt meiner Frau *Karin*, die mir als Lektorin und Ansprechpartnerin stets zur Seite stand und die durch ihre Fotografien zur Illustration meiner Arbeit beitrug.

Die vorliegende Arbeit wurde nach den neuen amtlichen Rechtschreibregeln erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Zusammenfassung

1	<i>Einführung</i>	1
2	<i>Grundlagen</i>	7
2.1	Die spektralen Eigenschaften der Sonnenstrahlung	7
2.2	Strahlungsgrößen, Messprinzipien und Empfindlichkeitscharakteristik	10
2.3	Wechselwirkung grüner Pflanzen mit der Sonnenstrahlung	15
2.4	Einführung in die Theorie der Lichtwellenleiter	20
2.5	Modellierung der PAR- Strahlung	24
2.5.1	Das verwendete 3D- Strahlungstransportmodell.....	24
2.5.2	Anpassung des Modells an den Versuchsbestand	27
2.5.3	Eingangsparameter für die Modellierung.....	27
3	<i>Entwicklung eines neuartigen Messsystems</i>	32
3.1	Beschreibung der einzelnen Komponenten der Messapparatur	32
3.1.1	Das Multi- Channel- Spektrometer- Modul (MCS- Modul)	32
3.1.1.1	Aufbau und Leistungsdaten des MCS- Moduls	32
3.1.1.2	Elektronischer Aufbau und Ansteuerung des MCS UV-NIR- Moduls.....	35
3.1.2	Aufbau der Positionierungsmechanik.....	36
3.1.2.1	Die Komponenten der Positionierungshardware	36
3.1.2.2	Ansteuerung der Positionierung.....	39
3.1.3	Lichtwellenleitersensoren mit einer speziellen Lichteinkopplung	41
3.1.3.1	Beschreibung der verwendeten Lichtwellenleiter.....	41
3.1.3.2	Lichteinkopplung und Befestigung der Lichtwellenleiter.....	43
3.2	Aufbau und Konzeption der Strahlungskalibrierung	46
3.2.1	Dunkel- und Offset- Korrektur.....	47

3.2.2	Dämpfung und Normsensoren.....	48
3.2.3	Bestrahlungsstärkekalibrierung der Messsensoren.....	51
3.2.4	Fehlerberechnung bei der Kalibrierung	54
3.3	Das Messwerterfassungs-, Kalibrier- und Auswertungsprogramm	56
3.3.1	Die notwendigen Eingangsdaten für den Messablauf	57
3.3.1.1	Die Positionstabelle.....	57
3.3.1.2	Die Programmablauf- und die Zyklustabelle.....	58
3.3.1.3	Die Messorttabelle	59
3.3.2	Der Messablauf und die Struktur der Daten.....	60
3.3.2.1	Beschreibung der Messprogrammoberfläche und des Messablaufs ...	60
3.3.2.2	Datenstruktur, Dateinamenskonvention und Verzeichnisstruktur	62
3.3.3	Weitere Softwaremodule.....	63
3.3.3.1	Bestimmung der Kalibrierfaktoren	63
3.3.3.1.1	Sensormessungen für die Kalibrierung.....	63
3.3.3.1.2	Berechnung der Kalibrierfaktoren.....	65
3.3.3.2	Auswertung der Messdaten	66
3.4	Einsatz der Messapparatur im Kranzberger Forst bei Freising	67
3.4.1	Beschreibung des Messstandortes	67
3.4.2	Der Messaufbau und begleitende Messungen.....	69
4	<i>Ergebnisse und Diskussion</i>.....	73
4.1	Messgenauigkeit und Vergleichbarkeit der Messsensoren	73
4.2	Anzahl von Messsensoren.....	77
4.3	Die Strahlung zwischen 400 nm und 850 nm oberhalb und innerhalb des untersuchten Waldbestandes	78
4.3.1	Die integrale PAR- Bestrahlungsstärke	81
4.3.1.1	Der Anteil von PAR und NNIR an der Globalstrahlung im Freiland.	81
4.3.1.2	PAR- Verteilung in Bodennähe unter dem Bestand	83
4.3.1.3	Diskussion der integralen Verhältnisse	85
4.3.2	Die spektrale Zusammensetzung der Strahlung zwischen 400 nm und 850 nm	86
4.3.2.1	Das Sonnenspektrum über dem Bestand.....	87
4.3.2.1.1	Der Anteil von Blau, Grün, Rot und NNIR am Spektrum.....	87

4.3.2.1.2	FR:R (Far Red : Red)- Verhältnis	89
4.3.2.2	Die wellenlängenselektive Dämpfung innerhalb des Bestandes	90
4.3.2.2.1	Die Verhältnisse zwischen PAR und NNIR im Sonnenspektrum	90
4.3.2.2.2	Die spektrale Verschiebung innerhalb des PAR- Bereiches	92
4.3.2.2.3	FR:R (Far Red : Red)- Verhältnis	97
4.3.2.3	Diskussion der spektralen Verhältnisse.....	102
4.4	Vergleich der PAR- Messdaten mit Modellrechnungen.....	103
4.4.1	Die PAR- Verteilung in Bodennähe	103
4.4.2	Diskussion	106
5	<i>Ausblick</i>	106
6	<i>Tabellenverzeichnis</i>	108
7	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	109
8	<i>Literaturverzeichnis</i>	115
9	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	131

Zusammenfassung

Mit der in der vorliegenden Dissertation entwickelten Messapparatur kann die Bestrahlungsstärkeverteilung im Wellenlängenbereich von 400 nm - 700 nm (Sensortyp 1) und 380 nm - 850 nm (Sensortyp 2) spektral hoch aufgelöst (etwa 0,8 nm) an bis zu 300 exponierten Messstellen mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden. Für diese Aufgabe wurden spezielle Sensoren entwickelt, die eine Erfassung des Strahlungsangebotes fast im gesamten Raumwinkel ermöglichen. Die Lichtinformation vom Messort wird über Lichtwellenleiter (LWL) zu einem zentral gelegenen, sehr schnellen Spektrometer weitergeleitet. Zwei Sensortypen wurden entwickelt, die an ihrem Ende einen kugelförmigen, milchig-weißen Diffusorkopf aus POM (**P**eroxy**m**ethylen) tragen. Die verwendeten LWL bestehen aus **P**oly**m**ethyl**m**etacrylat (PMMA, Sensortyp 1) beziehungsweise aus einem Glasfasermaterial (Sensortyp 2) und sind beide als Multimoden- LWL mit Stufenindex gefertigt. Das Detektionslimit befindet sich für den PMMA- Sensor bei $0,9 \text{ W/m}^2$ und für den Glasfasersensor bei $0,2 \text{ W/m}^2$. Dabei liegt der absolute Fehler in der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit (je nach Wellenlänge) zwischen 6 und 10 Prozent sowie der Fehler in der Vergleichbarkeit zweier Sensoren bei etwa 3%.

Innerhalb der Versuchsfläche wird in einem zentral gelegenen Messwagen eine exakt positionierbare Multiplexermechanik betrieben, mit der die Einkopplung des durch die Lichtwellenleiter transportierten Lichtes in das Spektrometer ermöglicht wird. Die einzelnen Messstellen werden sequenziell abgefahren, wobei die Positionierung und Messung im Durchschnitt etwa drei Sekunden pro Sensor dauert. Für 300 Sensoren beträgt ein Messzyklus 15 Minuten. Der Speicherplatz pro Messspektrum beträgt circa 8 Kilobyte, was bei 300 Sensoren und einer Messdauer von 17 Stunden pro Tag zu einem Datenvolumen von etwa 163 Megabyte pro Tag führt. Der Kopiervorgang und das Brennen der Daten auf CD umfasst einen Zeitaufwand von etwa einer Stunde, die spätere Berechnung integraler Werte aus der spektralen Information dauert für einen Tag etwa 45 Minuten (Pentium III/450MHz, 32-fach CDR).

Die Messwerterfassung über einen Rechner, die komplexe Ablaufsteuerung der Multiplexermechanik im Messbetrieb sowie die Kalibrier- und Auswertungsroutinen wurden in der Programmiersprache Delphi 1.0 erstellt.

Die gesamte Messapparatur wird seit August 1999 im Kranzberger Forst, einem Waldgebiet in der Nähe von Freising, eingesetzt.

Für einzelne Tage wurden die spektralen Verhältnisse über und unter dem Bestand vor und nach Laubfall näher untersucht, wobei sich Unterschiede bei wolkenlosen und bewölkten Tagen zeigten. Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Bei wolkenlosem Himmel liegt der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) an der Globalstrahlung (I+H) bei 40 - 50% und bei bedecktem Himmel bei 20 - 30%.
- Der NNIR (Near Near Infra Red, 700 nm - 850 nm)- Bereich der Strahlung beträgt bei klaren Tagen 15 - 25% und bei bewölktem Himmel 10 - 15% der Globalstrahlung.
- Unterhalb des Bestandes werden bei bewölktem Himmel circa 1% des Freiland-PAR gemessen. Durch Bestandeslücken erhöht sich dieser Wert an klaren Tagen bis auf etwa 10%.
- Der Grün- Anteil von PAR ist unterhalb des Bestandes über den Tag hinweg größer als der Blau- und Orange-Rot- Anteil. Nur morgens und abends erhöht sich der Blau- Anteil an PAR und kann an klaren Tagen den Grün- Anteil deutlich überragen.
- Die Untersuchung des relativen Anteils von Blau, Grün und Orange-Rot an PAR unterhalb des Bestandes zeigt nur bei den Buchen eine Erhöhung des Grün-Anteils gegenüber Freilandbedingungen.
- Das FR:R (Far Red: Red)- Verhältnis kann als relatives Maß für die Belaubungsdichte verwendet werden.
- Das an den Versuchsbestand angepasste 3D- Strahlungstransportmodell zeigt für klare Tage eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. An bedeckten Tagen werden die Strahlungsverhältnisse überschätzt.

1 Einführung

Die Vorhersage der Raum-Zeit-Dynamik von Waldökosystemen bestimmt neben meteorologischen und hydrologischen Messgrößen die räumliche Verteilung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR; **P**hotosynthetically **A**ctive **R**adiation) innerhalb des Bestandes, da hiervon unmittelbar die Photosynthese-Kapazität der Bestandeglieder abhängt. Die Konkurrenzsituation und die Raum-Zeit-Dynamik in strukturreichen Mischbeständen kann nur dann wirklichkeitsnah nachgebildet und prognostiziert werden, wenn PAR möglichst gut parametrisiert werden kann. Die Wachstumsabläufe in strukturreichen Rein- und Mischbeständen werden, neben der Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen, maßgeblich von den herrschenden Strahlungsverhältnissen gesteuert (*Monsi und Saeki, 1953*), so dass bei der Erfassung solcher Systeme ein besonderes Schwergewicht auf die räumliche Messung von PAR gelegt werden muss. Eine wissenschaftliche Erforschung, insbesondere die Erfassung quantitativer Zusammenhänge zwischen Lichtgenuss und Waldwachstum, wurde Ende des 18. Jahrhunderts eingeleitet (*Larcher, 1980; Brechtel, 1962; Dirmhirn, 1964; Nägeli, 1940; Cieslar, 1904*). Seitdem ist insbesondere im Bereich der Agrarwissenschaften ein umfangreiches Wissen über die Steuerung des Wachstums von Pflanzen und Pflanzenorganen durch die Beleuchtungsstärke erarbeitet worden.

PAR wurde, aufgrund von Absorptions-, Reflektions- und Transmissionseigenschaften grüner Pflanzen und deren Quantensensitivität für die Photosynthese, im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm definiert (*McCree, 1972a, 1972b; Monteith, 1973; Stamper und Allen, 1979; Rao, 1984; Langholz und Häckel, 1985*). Während das menschliche Auge in Wellenlängenbereichen von 550 nm (gelb-grün) die größte Empfindlichkeit besitzt, absorbiert das Chlorophyll der Blätter stärker in den Bereichen um 450 nm (blau) und 670 nm (orange-rot). So muss genau genommen immer zwischen 'Beleuchtungsstärke' und 'photosynthetisch aktiver Strahlung' unterschieden werden, so auch bei Messgeräten wie Luxmeter oder PAR- Messern, die andere Empfindlichkeitskurven aufweisen müssen. Wie in Kapitel 2.2 gezeigt wird, unterscheidet sich die spektrale Empfindlichkeitsverteilung des menschlichen Auges (Licht, Beleuchtung) deutlich von der Chlorophyll-Absorptionskurve (z.B. *Dirmhirn,*

1964; Vezina und Pech, 1964; Tanner und Eller, 1986; Rock et al., 1994; Richter und Fukshansky, 1996a, 1996b).

Die auf einen Bestand treffende PAR wird meist in ihren diffusen und ihren direkten Strahlungsanteil aufgeteilt (Bristow et al., 1985; Spitters, 1986; Gueymard, 1989), da sich beide Anteile im Bestand nicht nur in ihren Intensitäten (Hutchinson und Matt, 1976, 1977; Gendron et al., 1998), Richtungsverteilungen (Reifsnyder et al., 1971; Hutchinson und Matt, 1976) und spektralen Zusammensetzungen (Evans, 1956; Holmes und Smith, 1977; Smith und Morgan, 1981; Chazdon, 1988) unterscheiden, sondern auch in ihrem Transmissionsverhalten beim Durchgang durch Pflanzenbestände Abweichungen zeigen (Anderson 1969, 1970; Galoux et al., 1981; Weiss und Norman, 1985; Kimes et al. 1987; Brunner, 1994).

Die Photosyntheserate eines Pflanzenbestandes wird dabei sowohl durch die Bestandesgeometrie als auch durch die Helligkeitsverteilung der Himmelsstrahlung beeinflusst (z.B. de Wit, 1965; Duncan et al., 1967; Ross und Nilson, 1968; Ross, 1970, 1975, 1981; Norman und Jarvis, 1975; Ondok, 1977; Nilson, 1977, 1992; Oker-Blom und Kellomäki, 1981, 1982, 1983; Oker-Blom et al., 1983, 1989a, 1989b; Norman und Welles, 1983; Oker-Blom, 1985a, 1985b).

Abhängig von der Bestandesstruktur (Sinclair und Knoerr, 1982; Smolander, 1984; Baldocchi et al., 1986), vom Bestandaufbau und von der Bestandesdichte (Gatherum, 1961; Reifsnyder et al., 1971; Eber, 1972) und, durch unterschiedliche Anteile in diffuser und direkter Strahlung, von der Außenhelligkeit (Kern, 1966; Reifsnyder et al., 1971; Hutchinson und Matt, 1976, 1977; Hutchinson et al., 1980; Sinclair und Knoerr, 1982; Smolander, 1984) kann die räumliche Verteilung des Strahlungsfeldes unterhalb eines Pflanzenbestandes sehr stark variieren. In Bestandeslücken und an Waldrändern können sogar annähernd Freilandsituationen erreicht werden (Mosandl, 1984; Brunner, 1993, 1994).

Ist die potenzielle Photosyntheserate ganzer Bäume beziehungsweise einzelner Äste und Zweige von Interesse oder handelt es sich um einen relativ lockeren Bestand, so muss speziell auch der diffuse, seitlich einfallende Strahlungsanteil Berücksichtigung finden (z.B. Lauscher und Schwabl, 1934; Baumgartner, 1955; Flemming, 1962, 1964; Zelawski et al., 1973; Oker-Blom et al., 1989a, 1989b), was durch planare Sensorflächen nur eingeschränkt möglich ist (Byrne, 1966).

Die spektrale Zusammensetzung des Strahlungsfeldes unterhalb eines Bestandes wird einerseits durch die äußeren atmosphärischen Bedingungen (Bewölkung, Anteil diffuser und direkter Strahlung) beeinflusst (*Holmes und Smith, 1977; Smith und Morgan, 1981*), andererseits durch Absorption, Reflektion und Transmission an Pflanzenteilen verändert (*Zavitkovski, 1982; Ehrhardt und Eimern, 1983; Brunner, 1993, 1994; Sattin, 1997*). Die beobachtete Gesamtstrahlung setzt sich dabei immer aus einem spektral veränderten und einem durch Bestandeslücken unveränderten Strahlungsanteil zusammen (*Reifsnyder et al., 1971; Vezina und Boulter, 1966; Brunner 1993*). Der relative Anteil von PAR an der Globalstrahlung (300nm bis 3µm) nimmt wegen der wellenlängenabhängigen Streucharakteristik der Pflanzenteile (*Gates, 1980; Kapitel 2.3*) im Bestand gegenüber dem Freiland stark ab, was zu einer relativen Überhöhung ab 700nm zum NIR- Bereich (Near Infrared Radiation) hin führt (z.B. *Sauberer und Härtel, 1959; Vezina und Boulter, 1966; Ross, 1975; Smith und Morgan, 1981; Mitscherlich, Baldocchi et al., 1981, 1984b; Pereira et al., 1982; Sivakumar und Virmani, 1984; McLellan und Frankland, 1985; Tanner und Eller, 1988; Myneni et al., 1989*). Innerhalb des PAR- Bereiches sind vor allem Chlorophylle und Carotinoide für die Veränderung des Spektralbereiches verantwortlich. Aus diesem Grund werden die blauen und roten Anteile des Spektrums relativ zum grünen Teil geschwächt (siehe Kapitel 2.3).

Schon seit *Hartig (1877)*, der das Licht als die entscheidende Größe für das pflanzliche Leben bezeichnete, wurden immer neue Messverfahren entwickelt, um die einfallende Sonnenstrahlung zu erfassen (z. B. von *Ramann, 1911, McCree, 1966; McPherson, 1969; Monteith, 1972; Dohrenbusch et al., 1994; Palva et al., 1998a; Parisi et al., 1997; Aaslyng et al., 1999*). Neben einer Vielzahl von Strahlungsmessgeräten, die zur Verfügung stehen, um Globalstrahlung, photosynthetisch aktive Strahlung oder Beleuchtungsstärke (Luxmeter) im Gelände zu messen, wurden auch Methoden mit hemisphärischen Photos zur Charakterisierung des Strahlungsklimas von Wäldern entwickelt (*Evans und Coombe, 1959; Anderson, 1970; Chazdon und Field, 1987; Rich et al., 1987; Becker et al., 1989; Rich, 1990; Wang et al., 1992*). Wesentlich ist, dass Messgeräte wie beispielsweise Beleuchtungsmesser als Relativgeräte für Strahlungsgenuss und Verfahren der Fisheye-Technik erst dann korrekt angewendet und in ihren Ergebnissen richtig interpretiert werden können, wenn sie zunächst auf Flächen,

von denen die Strahlungsverhältnisse umfassend bekannt sind, erprobt und geeicht worden sind (*Evans und Coombe, 1959; Rich et. al., 1993*).

Eine oft verwendete Größe, um die Bestandesstruktur beziehungsweise die Lichtverhältnisse innerhalb eines Bestandes zu charakterisieren, ist der Blattflächenindex oder LAI (**Leaf Area Index**). Der LAI wurde durch *Watson (1947)* als die dimensionslose Größe der photosynthetisch aktiven Oberflächen (eine Seite) pro Bodenfläche definiert. *Monsi und Saeki (1953)* zeigten, dass bei einer zufälligen Raumverteilung der Blätter der LAI die optische Tiefe im Lambert-Beer-Gesetz (siehe F - 1) repräsentiert (z.B. *Sivakumar und Virmani, 1984*).

$$I_i = I_0 e^{-kL_i} \quad \text{F - 1}$$

Dabei ist **I** der Strahlungsfluss in der Ebene **i** innerhalb des Bestandes, **I₀** der Fluss der Strahlung in den Bestand hinein, **k** der Extinktionskoeffizient und **L_i** der LAI des Bestandes über der Ebene **i**. Der Extinktionskoeffizient ist eine Funktion aus den optischen Eigenschaften und der Geometrie der Blätter relativ zur Einfallsrichtung der Strahlung (*Campbell, 1986, Goudriaan, 1988*). Zur Bestimmung des LAI eines Bestandes werden sowohl direkte (Ernten und Vermessung) als auch indirekte zerstörungsfreie Methoden angewendet (z.B. *Lindroth und Perttu, 1981; Baldocchi et al., 1986; Lang und Yuequin, 1986; Lang, 1987; Neumann et al., 1989; Chen und Black, 1991; Whitford et al., 1995, Kucharik et al., 1998a; Levy und Jarvis, 1999; Van Gardingen et al., 1999; Lambert et al., 1999*).

Direkte Methoden zur Bestimmung des Strahlungsfeldes beziehungsweise des durch Photosynthese genutzten Strahlungsanteils (**IPAR; Intercepted PAR**) wurden beispielsweise von *Wang und Jarvis (1990)*, und *Bégué et al. (1994)* mittels PAR-Sensoren sowie von *Pierce und Running (1988)*, *Runyon et al. (1994)* und *Hassika und Berbigier (1998)* mittels Quantensensoren angewendet, wobei innerhalb und oberhalb eines Bestandes Messungen durchgeführt wurden. Auch indirekt konnten Aussagen über die photosynthetische Photonendichte (**PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density**) und über den Anteil von IPAR (absorbierter Strahlungsanteil) gemacht werden: beispielsweise durch Messungen der spektralen Reflektion über Beständen

(z. B. *Asrar et al., 1984; Gallo et al., 1985; Daughtry et al. 1992; Hanan et al., 1995*), durch Messung mit einem hemisphärischen Sensor (LAI-2000 Li-Cor Inc., Lincoln, NB) (*Hanan und Begue, 1995*), durch hemisphärische (fisheye) Fotografien am Boden des Bestandes (*Evans und Coombe, 1959; Anderson, 1970, 1981; Chazdon und Field, 1987; Rich, 1990; Clearwater et al., 1999*) und durch Zusammenhänge zwischen IPAR und LAI (*Hipps et al., 1983*).

Kleine Messgeräte beziehungsweise Sensoren zur raumbezogenen Erfassung von PAR sind von besonderem Interesse (*Gutschick et al., 1985; Dohrenbusch, 1989; Wagner und Nagel, 1992; Aaslyng et al., 1999*), da sie an vielen Stellen direkt an der Pflanze befestigt sind und zur Parametrisierung von Wuchsgesetzmäßigkeiten und Modellansätzen beitragen können. Messgeräte zur Erfassung des integralen Energiewertes beziehungsweise der integralen Bestrahlungsstärke an sehr vielen Messpunkten wurden bereits von *Gutschick et al. (1985)* und *Palva et al. (1998a)* vorgestellt. *Gutschick et al. (1985)* arbeitete dabei mit vielen Photodioden, die an Blättern befestigt waren. *Palva et al. (1998b)* und *Palmroth et al. (1999)* nutzten Lichtwellenleiter, deren eine Enden auf einer 200 mm mal 110 mm großen Haltevorrichtung, in die ein Zweig eingespannt werden kann, montiert sind. Die Lichtwellenleiter werden gebündelt und auf ein CCD (Charge Coupled Device)-Element geführt. Dort wird dann ein integrales Lichtsignal registriert. Diese Anwendung ist für eine sehr große Messdichte innerhalb eines kleinen Raumbereiches gedacht. *Vogelmann und Björn (1984)* entwickelten ein Gerät, mit dem sie über einen Lichtwellenleiter den Lichtgradienten und die spektralen Gegebenheiten eines einzelnen Pflanzenblattes messen konnten. Kleine planare Sensoren zur PAR Messung wurden ebenso eingesetzt und weiterentwickelt (*Ögren und Sjöström, 1990; Aaslyng et al., 1999*) wie passive Dosimeterverfahren (*Parisi et al., 1997, 1998*).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer neuartigen Messapparatur sowie die Quantifizierung der spektralen Verteilung von PAR und der Strahlung bis 850 nm innerhalb eines Fichten- Buchen- Mischbestandes. Die Messapparatur ermöglicht es nicht nur, einen integralen Energiewert pro Messstelle aufzuzeichnen, sondern darüber hinaus auch die spektrale Verteilung von PAR, FR- Strahlung (**F**ar **R**ed; 700 nm bis 760 nm) sowie Strahlung bis 850 nm an bis zu 300 im Bestand verteilten Messstellen zu erfassen. Die Lichtinformation wird dabei über Lichtwellenleiter zu einem zentral

gelegenen, sehr schnellen Spektrometer geleitet, das auf einer X/Y-Positionierungsmechanik befestigt ist. Vorarbeiten dazu wurden in meiner Diplomarbeit (*Reitmayer, 1997*) geleistet. Die einzelnen Lichtwellenleiterenden werden sequenziell abgefahren. Aus dieser Information können schließlich entsprechende Spektralbereiche integriert und durch Umrechnungsfunktionen sowohl in Watt pro Quadratmeter und Mikroeinstein pro Quadratmeter und Sekunde als auch in Lux (Lumen pro Quadratmeter) umgerechnet werden.

Modellrechnungen mit einem speziell für diesen Bestand modifizierten 3D-Strahlungsmodell, das spektral aufgelöst rechnet und eine integrale Information als Ausgabe ermöglicht, werden ebenfalls durchgeführt und mit den Messwerten verglichen. Eine nähere Beschreibung des 3D- Modells und eine kurze Einführung in die Strahlungsmodellierung wird in Kapitel 2.5 gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Die spektralen Eigenschaften der Sonnenstrahlung

Die Strahlung der Sonne kann annähernd als die eines Schwarzen Körpers mit der Temperatur von etwa 5800 K (Wijk und Scholte, 1963; Gates, 1980; Häckel, 1993) angesehen werden. Die Solarkonstante (extraterrestrische Strahlung) hat einen Wert von 1370 W/m^2 und variiert im mehrjährigen Mittel um weniger als 1% (Häckel, 1993). Kurzzeitigere Schwankungen durch die elliptische Erdbahn (etwa 7%) beziehungsweise durch veränderte Sonnenaktivitäten (etwa 3%) können allerdings auftreten. Die Einstrahlung wird an der Obergrenze der Erdatmosphäre zu etwa 30 % (Liou, 1980; Häckel, 1993) wieder in den Weltraum reflektiert (Albedo), der Rest wird von der Atmosphäre beziehungsweise von der Erdoberfläche absorbiert.

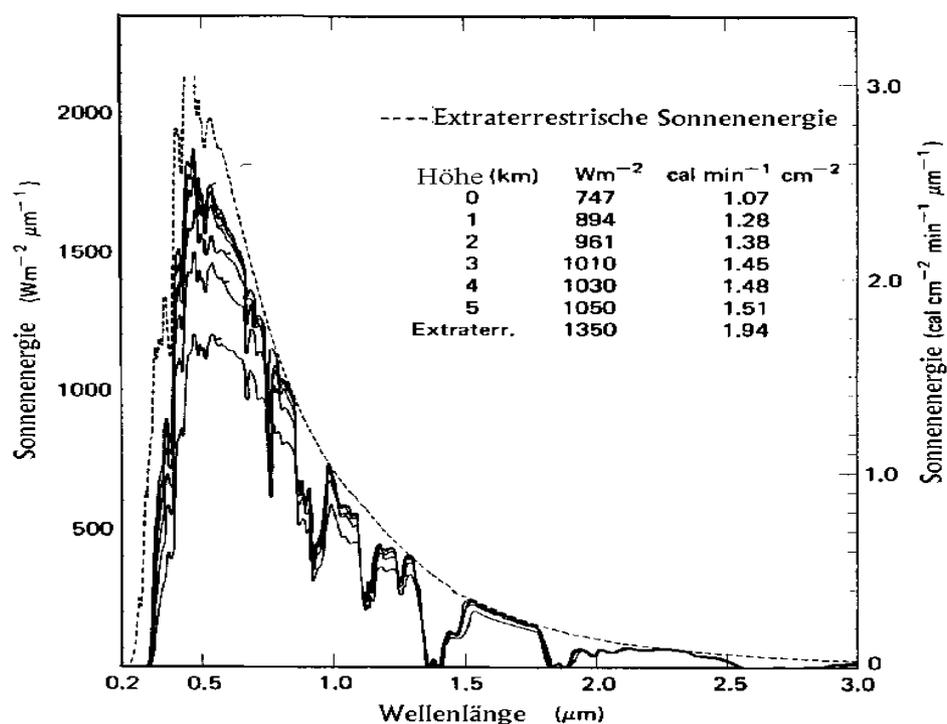


Abbildung 1: Spektrale Verteilung der Sonneneinstrahlung in verschiedenen Höhen über Normalnull; gemessen an einer senkrecht zur Sonneneinstrahlung stehenden Fläche als Funktion der Wellenlänge (nach: Gates, 1980).

Die Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche liegt zu 98% zwischen 0,3 und 3 Mikrometer, mit einem Maximum bei circa 500 nm (*Fritz, 1958; Liou, 1980; Sivakumar und Virmani, 1984.*). Der Median der Energieverteilung dieser kurzwelligeren Strahlung ist bei der Wellenlänge von 710 nm zu finden. Beim Durchgang der Strahlung durch die Erdatmosphäre verringern sowohl Absorptions- als auch Streuverluste die Energiemenge, die auf die Erdoberfläche trifft (Abbildung 1).

Im UV- Bereich werden Absorptionen beispielsweise durch Photodissoziation der Sauerstoff- beziehungsweise Stickstoffmoleküle hervorgerufen und im Infrarotbereich durch Rotations- beziehungsweise Vibrationsanregung dreiatomiger Moleküle wie Ozon, Wasser und Kohlendioxid verursacht. Die Sonnenstrahlung unterhalb von 290 nm wird in erster Linie durch die Ozonschicht bereits in einer Höhe von circa 15 - 30 km absorbiert (*Liou, 1980; Fabian, 1984; Häckel, 1993*). Darüber hinaus tragen die wellenlängenabhängige Streuung an Luftmolekülen (Rayleigh- Streuung) und die wellenlängenunabhängige Streuung an Aerosolen und Dunstteilchen (Mie- Streuung) ebenfalls zum Energieverlust bei (*Möller, 1973, Bd. II; Galoux et al., 1981 ; Roedel, 1992*). Die gesamte auf die Erdoberfläche treffende, kurzwellige Strahlung wird als Globalstrahlung (**G**) bezeichnet. Sie setzt sich aus dem direkt von der Sonne kommenden Anteil (**I**) und dem aus Streuung und Reflexion verursachten diffusen Strahlungsanteil (**H**) zusammen. Der Anteil der direkten Strahlung an der Globalstrahlung bewegt sich zwischen 80% an sehr klaren Tagen und 0% bei vollständiger Bedeckung (*Sauberer und Härtel, 1959; Campell, 1981; Mitscherlich, 1981; Spitters et al., 1986; Brunner, 1993*). Der nicht von der Erdoberfläche absorbierte, kurzwellige Strahlungsanteil wird als Reflexstrahlung (**R**) bezeichnet. Dadurch ergibt sich die kurzwellige Strahlungsbilanz (**Q**) für planare Flächen zu:

$$Q = I \cdot \sin(h) + H - R \qquad \text{F - 2}$$

Für planare Sensorflächen ist dabei der direkte Strahlungsanteil **I sin(h)**, wobei **h** die Sonnenhöhe und **I** die Intensität der direkten Sonnenstrahlung angibt. Die Globalstrahlung **G** ist dabei für planare Sensoren die Summe aus direkter und diffuser Himmelsstrahlung.

$$G = I \cdot \sin(h) + H$$

F - 3

Die langwellige Ausstrahlung oder Temperaturstrahlung der Erde reicht von etwa 3 μm bis 60 μm und hat ihr Maximum bei etwa 10 μm (Häckel, 1993). Diese langwellige Ausstrahlung soll nicht weiter berücksichtigt werden.

Die Globalstrahlung ist sehr stark von den atmosphärischen Bedingungen und dem Bedeckungsgrad des Himmels abhängig. Die Winkelverteilung der diffusen Strahlung ist im Allgemeinen sehr komplex (Oker-Blom und Kellomäki, 1982). Für spezielle Bedingungen wurden Näherungsfunktionen eingesetzt, die in Modellrechnungen verwendet werden. Monsi und Saeki (1953) sowie Idso und de Wit (1970) benutzten das Modell des UOC (Uniform Overcast Sky). Ein weiteres Modell betrachtet einen gleichmäßig bewölkten Himmel (SOC, Standard Overcast Sky), bei dem eine azimut-isotrope Helligkeitsverteilung angenommen wird (Moon und Spencer, 1942). Schließlich betrachtet die CS (Clear Sky)- Annahme die Sonne als hellsten Punkt am Himmel und geht von einer Helligkeitsabnahme zum Horizont hin aus (Kimball und Hand, 1921; Pokrowski, 1929; Grant, 1985).

Der für den Menschen sichtbare Bereich des Sonnenspektrums liegt zwischen etwa 390 nm und 760 nm (Brunner, 1993) und der für die Photosynthese wichtige Strahlungsanteil (PAR; Photosynthetically Active Radiation) wurde zwischen 400 nm und 700 nm definiert (McCree, 1972b; Monteith, 1973; Stamper und Allen, 1979; Rao, 1984; Langholz und Häckel, 1985). Der über einen Tag gemittelte Anteil von PAR an der Globalstrahlung liegt dabei im Freiland zwischen etwa 0,5 bis 0,3 (McCree, 1966; Britton und Dodd, 1976; Szeicz, 1974; Ross, 1975; Pereira et al., 1982; Langholz und Häckel, 1985; Spitters et al., 1984; Roux et al., 1997; Udo und Aro, 1999), wobei leichte Variationen je nach Bedeckungsgrad und Jahreszeit auftreten (McCree, 1966; Szeicz, 1974; Howell et al., 1983; Rao, 1984; Alados et al., 1996; Grant et al., 1996). Durch die bevorzugte Streuung kurzer Wellenlängen erhöht sich der diffuse Strahlungsanteil im PAR- Bereich an der Globalstrahlung. An klaren Tagen beträgt diese Erhöhung etwa 30 - 40% (Spitters et al., 1986; Brunner, 1993). Der Anteil der PAR an der direkten kurzwelligen Strahlung schwankt mit der Sonnenstandshöhe über

dem Horizont und liegt zwischen etwa 0,2 am Horizont und 0,4 im Zenit (*Karalis, 1989; Grant et al., 1996*).

2.2 Strahlungsgrößen, Messprinzipien und Empfindlichkeitscharakteristik

Bei der Strahlungsmessung werden im Wesentlichen die in Tabelle 1 aufgeführten Größen angegeben. Dabei wird zwischen den physikalischen Eigenschaften des Strahlungsfeldes und der Photometrie (physiologisch) unterschieden, wobei letztere den Teil der Strahlung bewertet, der vom menschlichen Auge wahrgenommen wird (*Gerthsen et al., 1981*). Die Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges $V(\lambda)$ ist in Abbildung 2 dargestellt. Bei jeder Messung sollte darauf geachtet werden, dass ein Messgerät mit der richtigen Empfindlichkeitscharakteristik gewählt wird, um Fehleinschätzungen zu vermeiden.

Als SI- Basiseinheit (**S**ystème **I**nternational d'Unités) der Lichtstärke ist die Candela (cd) definiert: 1 Candela ist dabei die Lichtstärke, mit der $1/60 \text{ cm}^2$ der Oberfläche eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck von 1013,25 hPa erstarrenden Platins senkrecht zu seiner Oberfläche leuchtet (*13. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, 1967; aus Schuh: Enzyklop., 1980*).

Tabelle 1: Messgrößen für die einfallende Strahlung, bezogen auf die bestrahlte Fläche A_E und die Zeit t der Lichteinwirkung (Fritschen und Gay, 1979; Gerthsen et al., 1989; Kuchling, 1989).

physikalisch: Strahlung			physiologisch: Licht		
Raumwinkel	Ω	Sterrad [sr]	Raumwinkel	Ω	Sterrad [sr]
Energie	E	Joule [J]	Lichtmenge	Q	Lumensek. [lm s]
Strahlungsfluss, Strahlungsleistung	$\Phi_e = \frac{E}{t}$	Watt [W]	Lichtstrom	$\Phi_e = \frac{Q}{t}$	Lumen [lm]
Strahlungsstärke	$I_e = \frac{\Phi}{\Omega}$	[W/sr]	Lichtstärke	$I_e = \frac{\Phi}{\Omega}$	[cd] = [lm/sr]
Bestrahlung	$H_e = \frac{E}{A_E}$	[J/m ²]	Beleuchtung	$H_e = \frac{Q}{A_E}$	Luxsek. [lx s]
Bestrahlungsstärke	$E_e = \frac{\Phi_e}{A_E}$	[W/m ²]	Beleuchtungs- dichte	$E_e = \frac{\Phi_e}{A_E}$	Lux [lx]

Aus Konventionsgründen wird bei pflanzenphysiologischen Untersuchungen häufig die Einheit Einstein verwendet. 1 Einstein ist die Anzahl von Photonen, die in einem Mol vorhanden sind. Wird ein Einstein ($6,023 \times 10^{23}$ Photonen) gemessen, so entspricht dies bei einer Wellenlänge von 500 nm einer Energie von $2,39 \times 10^5$ J.

Nach dem Messprinzip lassen sich Strahlungsmessgeräte prinzipiell in drei Kategorien einteilen (Dirmhirn, 1964; Kubin, 1971; Monteith, 1972; Fritschen und Gay, 1979), nämlich in thermische und in Quanten- Strahlungsdetektoren. Bei den thermischen Detektoren wird die eingestrahelte Energie in Wärme umgesetzt und diese gemessen. Quantendetektoren wandeln die Strahlung in eine andere Energieform als Wärme um. Bei thermischen Detektoren können unter anderem Thermoelemente, thermomechanische Verfahren und Destillationsdetektoren unterschieden werden. Bei Quantensensoren sind beispielsweise photoelektrische und photochemische Verfahren zu nennen. Der Unterschied des Messprinzips wird in der Empfindlichkeitsänderung bei verschiedenen Wellenlängen deutlich (Dirmhirn, 1964).

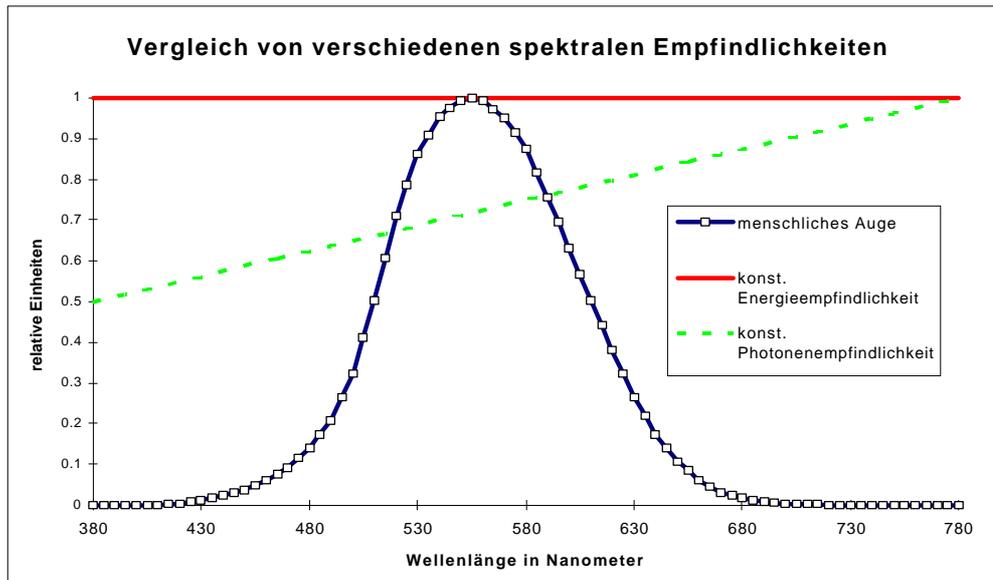


Abbildung 2: relative spektrale Empfindlichkeit verschiedener Detektorarten; a) photometrische Empfindlichkeit (Auge des Menschen), b) konstante Energieempfindlichkeit, c) konstante Photonenempfindlichkeit; (nach Hartmann, 1978; Dohrenbusch, 1995).

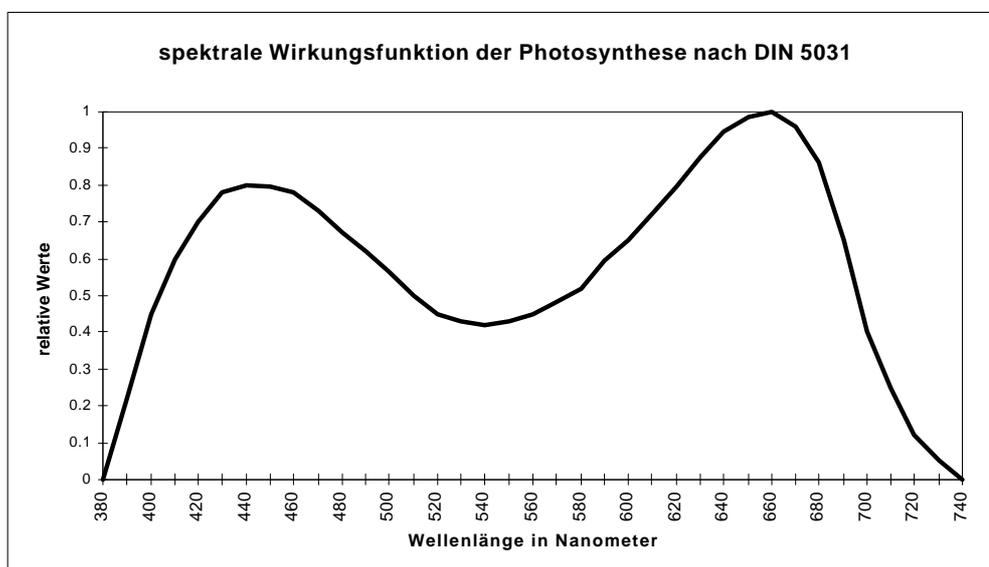


Abbildung 3: spektrale Wirkungsfunktion der Photosynthese in relativen Einheiten nach DIN 5031, Teil 10.

Dabei haben thermische Strahlungsdetektoren über dem Wellenlängenbereich, den sie erfassen können, eine gleiche Empfindlichkeit für jede Wellenlänge. Dagegen ist die

Empfindlichkeit von Quantendetektoren wellenlängenabhängig. Das Auge des Menschen hat mit der so genannten photometrischen Empfindlichkeit $V(\lambda)$ ebenfalls eine spezifische spektrale Energieempfindlichkeit. In Abbildung 2 sind die Empfindlichkeitskurven für die verschiedenen Detektoren angegeben.

Grüne Pflanzen zeigen eine spezielle wellenlängenabhängige Sensibilität bei der Photosynthese, auf die in Kapitel 2.3 näher eingegangen wird. Die photosynthetisch nutzbare Strahlung PUR (**P**hotosynthetisch **U**sable **R**adiation) richtet sich nach dieser speziellen Quantensensibilität grüner Pflanzen (Abbildung 3) innerhalb des PAR-Spektralbereiches (*DIN 5031, Teil 10; McCree, 1972a; Dohrenbusch, 1995*) und liegt bei etwa 61 % der PAR (*Dohrenbusch et al., 1995*). Messgeräte, die nur ein Energiesummensignal liefern, müssen für die Erfassung von PAR beziehungsweise PUR deshalb eine spezielle Empfindlichkeitscharakteristik (*DIN 5031, Teil 10; McCree, 1972a, 1972b; Langholz und Häckel, 1985; Brunner, 1993; Brunner, 1994; Dohrenbusch, 1995; Dohrenbusch et al., 1995*) aufweisen, um ein korrektes Messergebnis zu liefern.

Globalstrahlungsmesser wie zum Beispiel das Gerät CM11 der Firma Kipp & Zonen, das im Wellenlängenbereich von 300 nm bis circa 3 μm mit relativ konstanter Energieempfindlichkeit misst, sind dabei wegen der relativen Überhöhung der NIR unter dem Bestand keine geeignete Wahl. Für PAR- Messungen im Freiland liefern Messungen mit Globalstrahlungsmesser noch eine gute Korrelation, innerhalb eines Bestandes erzeugen sie falsche Ergebnisse. Sind dagegen Messungen für den Energiehaushalt beziehungsweise für Energiebilanzen gewünscht, so ist hier die Messung der Globalstrahlung erforderlich.

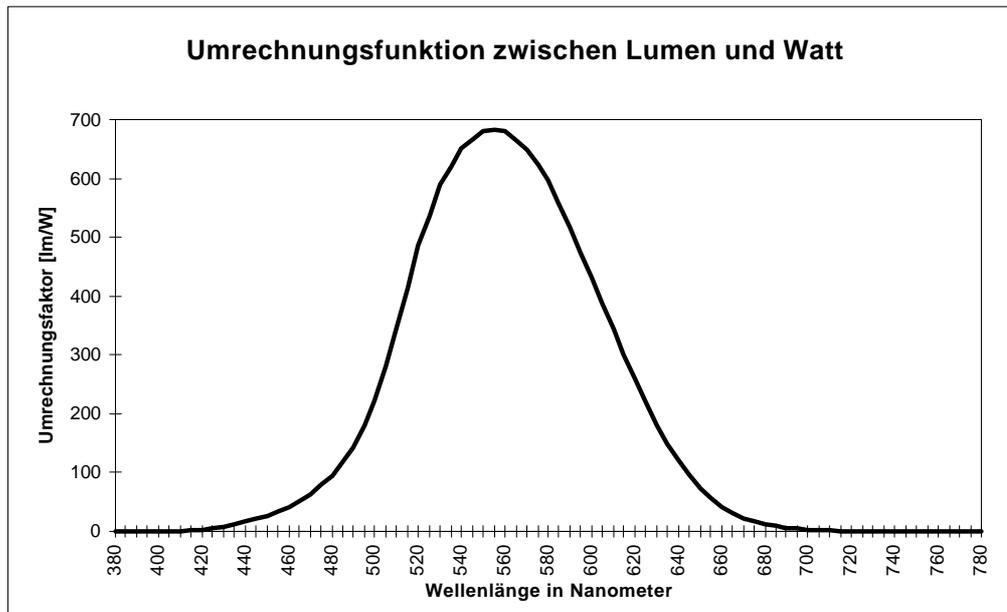


Abbildung 4: Umrechnungsfunktion zwischen der Bestrahlungsstärke in W/m^2 und dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges in lm/m^2 (Lumen pro Quadratmeter).

Ähnlich verhält es sich mit Luxmetermessungen, wobei hier die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges und die von grünen Pflanzen annähernd im selben Spektralbereich liegt. Dadurch wirkt sich die relative Überhöhung im NIR-Bereich nicht aus. Allerdings liegt gerade beim Maximum des Helligkeitsempfindens (ca. 550 nm) das lokale Minimum bei der Photosyntheseausbeute, die Maxima der Photosyntheseausbeute sind dagegen in der Augenempfindlichkeitskurve unterrepräsentiert. Durch die allgemeine Abnahme von PAR beim Durchgang durch die Pflanzenschicht zeigen Luxmetermessungen immer noch eine gute Korrelation zu PAR-Messungen.

Ist eine spektrale Information der Strahlung in Watt pro Quadratmeter vorhanden, so kann diese in die Beleuchtungsdichte in Lux $[lx]$ umgerechnet werden. Die Umrechnungsfunktion ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Maximum liegt bei der Wellenlänge von 555 nm und hat den Wert 683 Lumen pro Watt (Wijk und Scholtke, 1963; McCree, 1966; Gates, 1980; Kuchling, 1989).

2.3 Wechselwirkung grüner Pflanzen mit der Sonnenstrahlung

Die für die Photosynthese der grünen Pflanze nötige Strahlung entspricht in etwa dem sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums. Für diese photosynthetisch aktive Strahlung (PAR: Photosynthetically Active Radiation) wurde der Bereich 400 nm - 700 nm festgelegt (McCree, 1972a; Ross, 1981; Brunner, 1994; Hanan und Bégué, 1995).

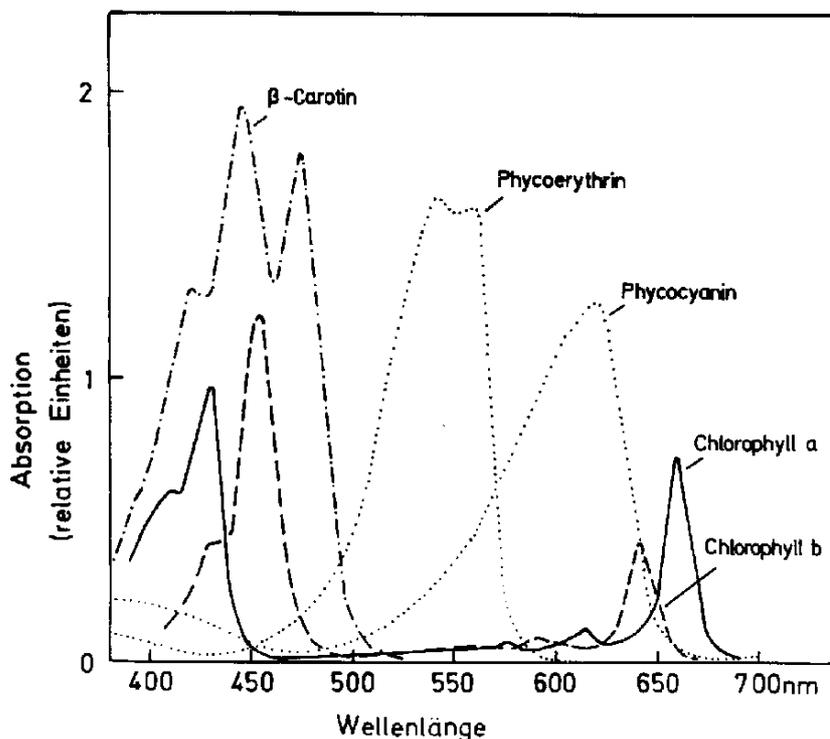


Abbildung 5: Absorptionsspektren von Chloroplastenpigmenten in Lösung. In grünen Pflanzen findet man eine Mischung verschiedener Chlorophylle und Carotinoide; [nach Zscheile: *Bot. Gaz.* **102**, 463 (1941) und *Plant Physiol.* **17**, 331 (1942); O'h Eochoa, in: *Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments* (Goodwin, Ed.), 407 Academic Press, London, New York 1966; aus Renger, 1978].

Innerhalb dieses Bereiches werden in erster Linie bestimmte Anteile des Spektrums im Rot- und Blaubereich (*Larcher, 1973; Renger, 1978*) für die Photosynthese genutzt (siehe Abbildung 5). Das Licht im Wald ist daher grüner als im Freiland. Die photosynthetisch nutzbare Strahlung PUR (**P**hotosynthetisch **U**sable **R**adiation) richtet sich nach der speziellen Quantensensibilität grüner Pflanzen innerhalb des PAR-Spektralbereiches (*DIN 5031, Teil 10; McCree, 1972a; Dohrenbusch, 1995*) und liegt bei etwa 61 % der PAR (siehe auch Kapitel 2.2; *Dohrenbusch et al., 1995*).

Das Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsverhalten einer grünen Pflanze wird in den verschiedenen Wellenlängenbereichen von unterschiedlichen Faktoren bestimmt (*Gates, 1980; Mitscherlich, 1981; Ross, 1981; Grant et al., 1995*).

Dabei ist die Absorption im unteren Wellenlängenbereich (kleiner als 700 nm) von den Absorptionsbanden des Chlorophylls, der Carotinoide und verschiedener Pigmente abhängig (Abbildung 5). Oberhalb von 1400 nm spielen die Rotations- und Vibrationsanregungen von Wassermolekülen eine entscheidende Rolle in der Absorptionscharakteristik.

Zwischen 700 nm und 1400 nm sinkt das Absorptionsvermögen auf ein niedriges Niveau, wohingegen Reflexions- und Transmissionsvermögen stark zunehmen. Der Verlauf von Reflexion, Transmission und Absorption ist für ein Baumwollblatt in Abbildung 6 dargestellt. Dabei ist der prinzipielle Verlauf für eine andere Blattsorte (grünes Blatt bei senkrechtem Lichteinfall) der gleiche, nur die Werte der drei Kurven müssen entsprechend angepasst werden (*Gates, 1980; Galoux et al., 1981*). Verändert sich der Einfallswinkel der Strahlung, so verändern sich diese Größen erheblich.

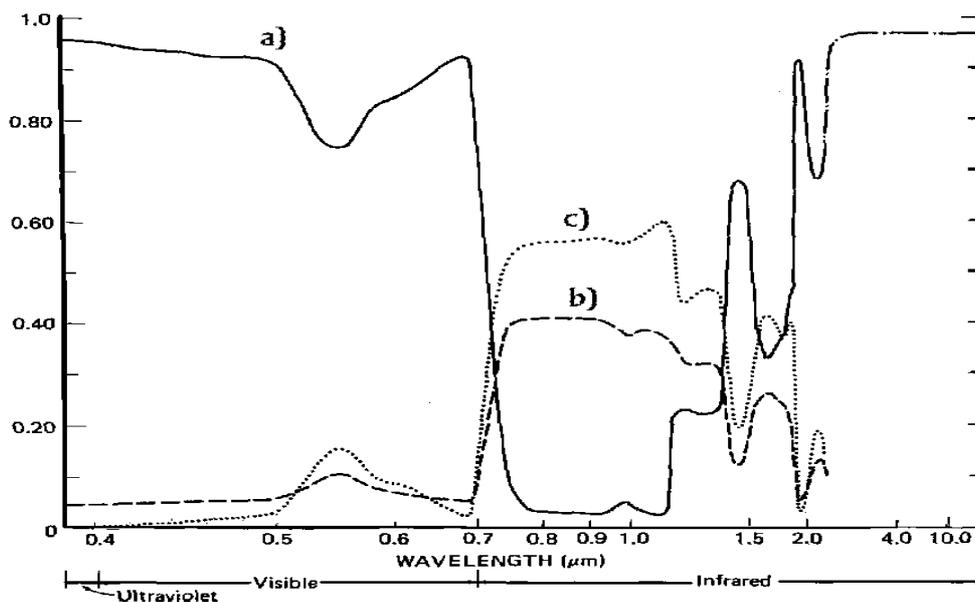


Abbildung 6: Spektrale Eigenschaften eines Baumwollblattes (obere Blattfläche) als Funktion der Wellenlänge: a) Absorption, b) Reflektionsvermögen, c) Transmissionsvermögen (nach Gates, 1980).

PAR kann auch durch wechselnde Umgebungsbedingungen wie Sonnenstand, Bewölkungsgrad, Bestandesdichte und Bestandesstruktur räumlich und zeitlich variieren (z.B. Baumgartner, 1960; Hutchison und Matt, 1977; Ehrhardt und Eimern, 1983; Eimern und Ehrhardt 1985; Green et al., 1995), was dann zu einer veränderten Photosyntheseleistung führt.

Modellrechnungen zur Bestimmung des PAR- Angebotes bei verschiedenen Umgebungsbedingungen (Alados et al., 1996) und Modelle für die Intensitätsminderung beim Durchgang der Strahlung durch die Blattflächen (Neumann et al., 1989) führten bereits zu einem guten Verständnis der allgemeinen Zusammenhänge.

Abgesehen von der Photosynthese gibt es noch weitere Wechselwirkungen zwischen grünen Pflanzen und der Sonnenstrahlung, bei deren Messung die Geräte andere Empfindlichkeitskurven aufweisen müssen. Dabei handelt es sich um thermische und photomorphogenetische, das heißt, hinsichtlich Wachstum und Entwicklung relevante Auswirkungen.

In Tabelle 2 werden verschiedene Wechselwirkungen mit den entsprechenden Wellenlängenbereichen dargestellt. Dabei ist auch der prozentuelle Anteil der entsprechenden Bereiche am gesamten einfallenden Sonnenlicht angegeben.

Tabelle 2: Auswirkung von Strahlung auf das pflanzliche Leben (aus Ross, J., 1981).

Art der Strahlung	Wellenlängenbereich in μm	Anteil in %	thermische Wirkung	Photosynthese	Photomorphogenese
UV	0,29-0,38	0-4	unwichtig	unwichtig	wichtig
PAR	0,38-0,71	21-46	wichtig	wichtig	wichtig
nahes Infrarot	0,71-4	50-79	wichtig	unwichtig	wichtig
Infrarot	4-100	-	wichtig	unwichtig	unwichtig

Für das Wachstum einer Pflanze ist nicht nur die gesamte Dauer des Lichtangebotes (*Lockhart, 1961; Hartmann und Haupt, 1978*), sondern auch die Qualität, das heißt, die spektrale Verteilung der Strahlung von Bedeutung (*Borthwick und Hendricks, 1961; Mohr, 1969*). Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen jeweils ein Beispiel für den Einfluss unterschiedlicher Bestrahlungseinflüsse auf das Wachstum verschiedener Pflanzen.

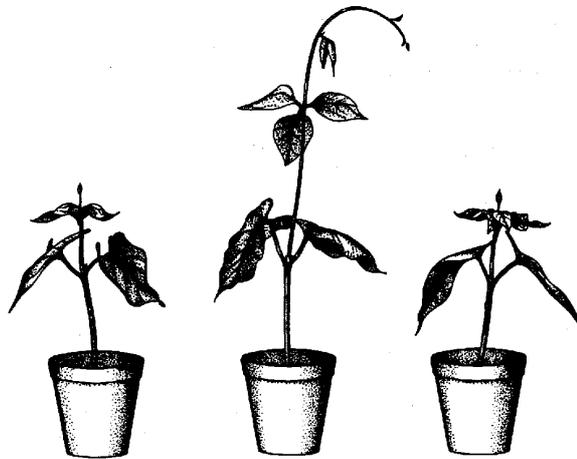


Abbildung 7: Nachweis für das reversible Hellrot- Dunkelrot- Photoreaktionssystem in „normal“ im Licht herangewachsenen grünen Bohnenpflanzen. Alle Pflanzen erhielten eine Hauptlichtperiode von 8 Std. Fluoreszenz- Weißlicht pro Tag. Links: kein Zusatzlicht. Mitte: 4 min. dunkelrot pro Tag unmittelbar nach dem Ende der Hauptlichtperiode. Rechts: 4 min. dunkelrot + 4 min. hellrot pro Tag unmittelbar nach dem Ende der Hauptlichtperiode (nach Hendricks (1964), aus Mohr, 1969).

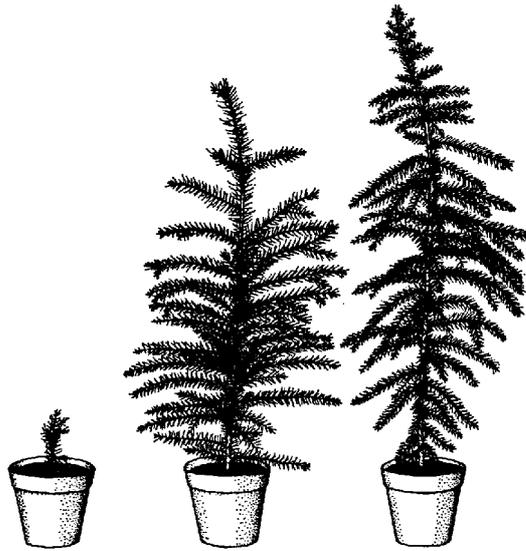


Abbildung 8: Einjährige Douglasie aus unterschiedlichen Photoperioden. Links: 12-stündiger Kurztag. Mitte: 12-stündiger Kurztag mit 1-stündiger Störlichtperiode in Nachtmitt. Rechts: 20-stündiger Langtag (nach Downs (1962), aus Mohr, 1969).

2.4 Einführung in die Theorie der Lichtwellenleiter

Lichtwellenleiter finden im Bereich der Nachrichtentechnik und Nachrichtenübertragung eine breite Anwendung. Die Vorteile beim Einsatz von Lichtwellenleitern in der optischen Übertragungstechnik liegen dabei speziell in:

- hohe Übertragungskapazität
- geringe Signaldämpfung
- vollständige elektrische Isolation (galvanische Trennung)
- Unempfindlichkeit gegen elektrische und magnetische Störungen
- keine Potentialprobleme (Erdschleifen)
- relativ geringes Gewicht
- relativ unempfindlich bei Temperaturschwankungen

Lichtwellenleiter (LWL) bestehen aus einem lichtführenden Kern mit Brechungsindex n_1 und einem Mantel mit Brechungsindex n_2 ($n_1 > n_2$). Mantel und Kern sind meist von einer Kunststoff- oder Gewebehülle umgeben, wodurch der LWL größeren mechanischen Belastungen standhalten kann. Bei LWL wird grundsätzlich zwischen zwei Arten unterschieden, nämlich den Monomodens- und Multimodens- LWL (Abbildung 9), von denen wiederum jede, je nach Übergang des Brechungsindex von Kern zu Mantel, in Stufen- bzw. Gradientenfasern eingeteilt wird.

Monomodenslichtwellenleiter bestehen aus Quarzglas und haben einen Kerndurchmesser kleiner als $10 \mu\text{m}$ (Kersten, 1984). Bei Monomodensfasern sind zwei zueinander orthogonale Wellentypen (zueinander senkrecht polarisierte Moden) ausbreitungsfähig. Die normierte Strukturkonstante V nimmt dabei Werte kleiner als 2,3 an. Diese Konstante ist wie folgt definiert (Kersten, 1984):

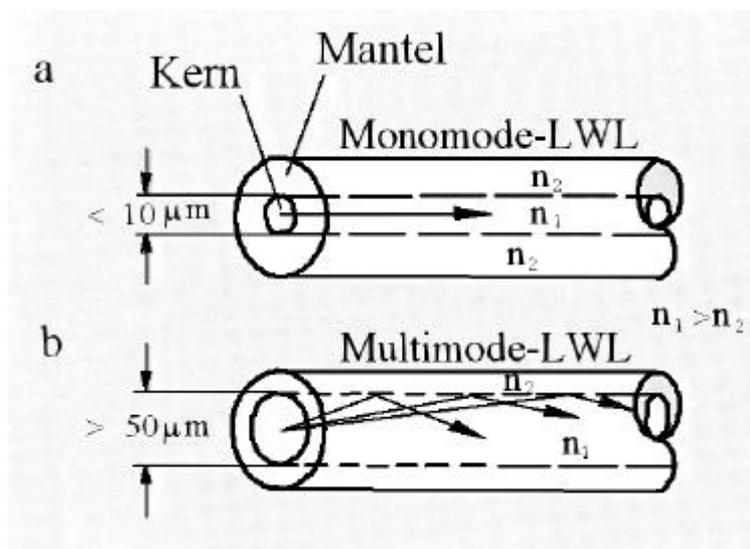


Abbildung 9: Bild über Aufbau von Monomoden- (a) und Multimoden- LWL (b); (Kersten, 1984).

$$V = \frac{2p \cdot a}{l_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2p \cdot a}{l_0} \cdot NA \quad \text{F - 4}$$

Dabei bedeuten:

- a Kernradius
- n_1, n_2 Brechungsindex von Kern und Mantel
- λ_0 Vakuumlichtwellenlänge
- NA Numerische Apertur

Multimoden- LWL haben einen größeren Kerndurchmesser (bis zu 1 mm), was eine Ausbreitung vieler Wellentypen ermöglicht. Die Gesamtzahl M dieser Wellentypen beträgt näherungsweise (Kersten, 1984):

$$M = \frac{V^2}{2} \quad \text{F - 5}$$

Typische Werte für M liegen zwischen 30 und 50.

Modeneffekte spielen erst eine Rolle, wenn der normierte Strukturfaktor V kleiner als 3 ist, da dann die Energieverteilung der vorhandenen Moden sehr stark eingeht (Menzel und Snyder, 1978).

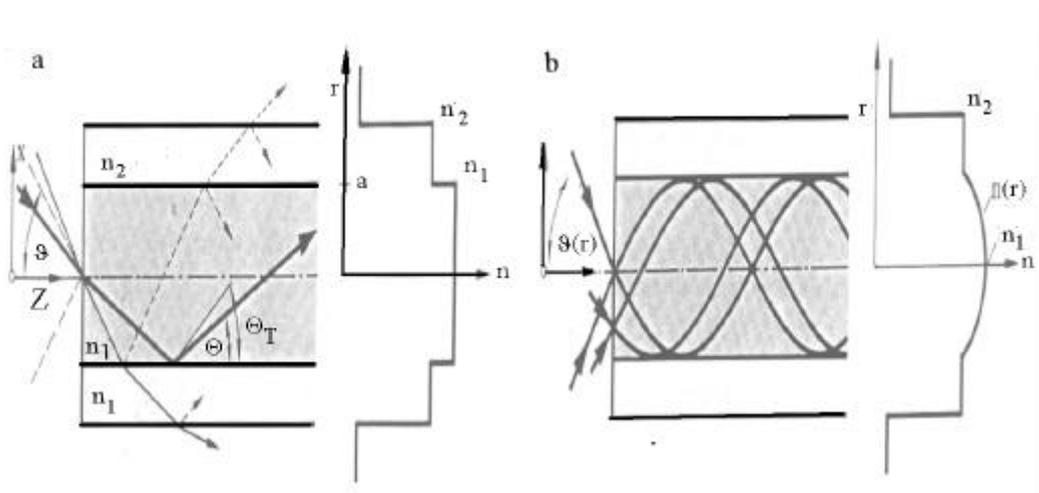


Abbildung 10: Stufen und Gradientenindex: Brechzahlverlauf für einen LWL mit Stufenindex (a) und einem LWL mit Gradientenindex (b); (Rosenberger, 1977).

Zwischen der numerischen Apertur und dem halben Öffnungswinkel ϑ besteht die Beziehung (Rosenberger, 1977) :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin J = n_1 \cdot \sin \Theta_T \quad \text{F - 6}$$

Θ_T ist der Grenzwinkel der Totalreflexion.

In Abbildung 10 ist der Verlauf des Brechungsindex bei einem LWL mit Stufen- bzw. mit Gradientenindex dargestellt. Dabei ist auffallend, dass bei einer Gradientenfaser der Öffnungswinkel (2ϑ) des eingestrahltten Lichtes um so kleiner sein muss, je weiter außerhalb der Achse der Strahl den Kern trifft, denn sonst findet keine Totalreflexion statt. Tritt das Licht am Kernradius ein, so werden nur noch achsenparallele Strahlen zugelassen. Bei gleichen Kernabmessungen und gleichen Brechungsindexdifferenzen wird dadurch bei einer Gradientenfaser nur etwa halb so viel Licht aufgenommen wie bei einer Stufenprofilfaser (Rosenberger, 1977).

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines LWL ist seine Dämpfungscharakteristik (Rosenberger, 1977). Dämpfungen in einem LWL können entweder durch

Abstrahlverluste aufgrund von geometrischen Unregelmäßigkeiten oder ungenügenden Reflexionseigenschaften des LWL, wie beispielsweise durch Krümmungen, hervorgerufen werden. Des Weiteren können materialabhängige Streudämpfungen und Absorptionen eine große Rolle spielen.

Die Dämpfung wird in der Technik üblicherweise in Dezibel pro Kilometer (dB/km) angegeben und gemäß der Formel

$$\mathbf{a} = \frac{1}{l} \cdot 10 \cdot \lg \frac{P_E}{P_A(l)} \quad \text{F - 7}$$

aus der Eingangs- (P_E) und der nach der Länge l messbaren Ausgangsleistung (P_A) bestimmt.

Eine weitere Möglichkeit, das Dämpfungsverhalten eines Lichtwellenleiters zu beschreiben, liegt in der Messung von Zählimpulsen beziehungsweise Intensitäten bei verschiedenen Lichtwellenleiterlängen. Durch die Gleichung

$$I = I_0 e^{-\frac{l}{L}} \quad \text{F - 8}$$

- mit
- I: Intensität bzw. Zählimpulse bei der Länge l
 - I_0 : Zählimpulse bei $l = 0$
 - l : Länge des LWL
 - L: charakteristische Länge, bei der das Signal auf $1/e$ (36,8 %) abgefallen ist,

lässt sich dieses Dämpfungsverhalten beschreiben, wobei die charakteristische Länge L angibt, bei welcher Lichtwellenleiterlänge die Zahl der Zählimpulse beziehungsweise die Lichtintensität auf 36,8 % des Ausgangswertes abgesunken ist.

2.5 Modellierung der PAR- Strahlung

Seit dem Lichtmodell von *Monsi und Saeki (1953)* wurden schon viele Versuche unternommen, das Strahlungsfeld innerhalb von Pflanzenbeständen theoretisch zu beschreiben. Dabei wurde der Bestand unter anderem durch geometrische Figuren wie Zylinder, Kugeln, Kegel und Ellipsoide (z.B. *Brown und Pandolfo, 1969; Schwarzbaum und Shaviv, 1976; Kuuluvainen und Pukkala, 1987; Pukkala et al., 1991, 1993; Brunner, 1998; Kenneth und Lieffers, 2000*), durch homogene Schichten (*Federer, 1971; Grace et al., 1987; Wang und Jarvis, 1990; Oker-Blom et al., 1991; Cescatti, 1997a; Sinoquet et al., 2000*) oder durch ein trübes Medium mit heterogenen dreidimensionalen Strukturen aus Wuchsmodellen (z.B. *Miessen, 1994; Knyazikhin et al., 1997*) sowie durch das Einbeziehen fraktaler Dimensionen (z.B. *Knyazikhin et al., 1998*) angenähert. Kleinräumige Schwankungen des Licht- Regimes innerhalb eines Bestandes konnten so vorhergesagt werden (*Grace et al., 1987; Wang und Jarvis, 1990; Knyazikhin et al., 1997; Cescatti, 1997b; Brunner, 1998*). Ein Überblick über die Theorie und über Modellansätze kann beispielsweise in den Arbeiten von *Lemur und Blad (1974), Ross (1981), Myneni et al. (1989, 1991)* beziehungsweise *Knyazikhin und Marshak (1991)* nachgelesen werden. Die modellhafte Simulation des Transports und der Interaktion elektromagnetischer Strahlung im heterogenen dreidimensionalen Umfeld hat große Fortschritte gemacht (z.B. *Norman und Wells, 1983; Ross und Marshak, 1984; Li und Strahler, 1986; Myneny et al., 1986a, 1986b; Myneni, 1991; Kimes et al., 1991; de Castro und Fetcher, 1998; Sinoquet et al., 2000; Kenneth und Lieffers, 2000*).

2.5.1 Das verwendete 3D- Strahlungstransportmodell

Am Institut für Bioklimatologie der Georg-August- Universität in Göttingen wird ein 3D- Strahlungsmodell eingesetzt, um den Strahlungstransport von PAR innerhalb eines Fichtenbestandes zu modellieren (*Myneni, 1991; Kranigk u: Gravenhorst, 1993; Kranigk et al., 1994; Knyazikhin et al., 1994, 1996, 1997, 1998*). Herr Oleg Panvyorof stellte ein Modell zur Verfügung, mit dem das Strahlungsfeld im PAR- Bereich integral für einen Reinbestand ermittelt werden kann. Dieses Modell, das im Folgenden kurz beschrieben werden soll (nähere Ausführungen finden sich z.B. bei *Miessen 1994*), basiert auf dreidimensionalen Transportgleichungen, in denen das Strahlungsfeld die

Lösung darstellt. Dabei müssen drei Variable sehr genau formuliert werden (*Ross, 1981*):

- die Architektur des Bestandes
- die optischen Eigenschaften der Blätter und des Bestandesbodens
- die äußeren meteorologischen Bedingungen und die Umgebung des Bestandes (Randbedingungen).

Der zu modellierende Bestand mit endlichen Abmessungen (X_s, Y_s, Z_s) in den drei Raumrichtungen wird auf seine Blätter reduziert und vereinfacht als trübes Medium angesehen. Dabei werden nur flache Blätter mit vernachlässigbarer Dicke betrachtet. In kartesischen Koordinaten sieht die Strahlungstransportgleichung für die stationäre monochromatische Intensitätsverteilungsfunktion $\mathbf{I}(\mathbf{r}, \vec{\Omega})$ folgendermaßen aus (*Ross, 1981; Myneni et al., 1989, 1991; Miessen, 1994*):

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} I(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\mathbf{s}(\vec{r}, \vec{\Omega}) I(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \int_{4\pi} \mathbf{s}_s(\vec{r}, \vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') I(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad F - 9$$

Der Ortsvektor \vec{r}' entspricht dem Koordinaten-Triplet (x, y, z) mit ($0 \leq x \leq X_s$), ($0 \leq y \leq Y_s$) und ($0 \leq z \leq Z_s$) und der Richtungsvektor $\vec{\Omega}$ hat einen Azimutwinkel ϕ , der von der positiven x-Achse aus entgegen dem Uhrzeigersinn in der (x,y)-Ebene verläuft und einen Polarwinkel θ , der von der nach oben gerichteten Normalen aus gemessen wird. Die linke Seite der Gleichung F - 9 stellt die Änderung der Intensität bei Bewegung in Richtung $\vec{\Omega}$ dar, der erste Term der rechten Seite die Schwächung der Intensität und der zweite Term ihre Stärkung aufgrund von Streuung aus allen möglichen Richtungen $\vec{\Omega}'$ in die betrachtete Richtung $\vec{\Omega}$. Die optischen Eigenschaften des Bestandes werden durch die Koeffizienten σ und σ_s bestimmt. σ ist der Extinktionskoeffizient, der die Wahrscheinlichkeit pro Weglänge ds angibt, dass ein Photon auf diesem Weg auf Blattelemente trifft (*Shultis und Myneni, 1988; Myneni, 1991; Miessen, 1994*).

Die Streueigenschaften werden durch den so genannten differentiellen Streukoeffizienten σ_s charakterisiert, der die Wahrscheinlichkeit pro Weglänge ds und Raumwinkel $d\Omega$ angibt, dass ein Photon auf dieser Wegstrecke aus allen Richtungen

$\vec{\Omega}'$ in einen Raumwinkel $d\vec{\Omega}$ um $\vec{\Omega}$ gestreut wird (*Shultis und Myneni, 1988; Myneni, 1991*).

Die Gleichung F - 9 ist nur mit folgenden Voraussetzungen gültig:

- zeitkonstante Intensität
- keine Frequenzverschiebung bei der Streuung
- keine Emissionen
- vernachlässigbare Polarisierungseffekte

Die Wechselwirkungskoeffizienten σ und σ_s können aus bestimmten optischen und strukturellen Eigenschaften von Blattelementen bzw. Blättern hergeleitet werden (*Ross, 1981; Shultis und Myneni, 1988*).

$$\mathbf{s}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\mathbf{p}} u_L(\vec{r}) \int_{2\mathbf{p}} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}) |\vec{\Omega}_L \bullet \vec{\Omega}| d\Omega_L \quad F - 10$$

$$\mathbf{s}_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\mathbf{p}} u_L(\vec{r}) \int_{4\mathbf{p}} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L) |\vec{\Omega}' \bullet \vec{\Omega}_L| g_L(\vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\Omega_L \quad F - 11$$

Dabei sind:

- \mathbf{u}_L die gesamte einseitige Oberfläche der Blätter pro Volumeneinheit (Blattflächendichte),
- $1/2\delta\mathbf{g}_L$ der Bruchteil der Blattfläche in einem Volumen um den Ort \mathbf{r} , deren Normale in einem Raumwinkelement um $\vec{\Omega}_L$ liegt und
- $\tilde{\mathbf{a}}_L$ die Streuphasenfunktion, die den Bruchteil der aus Richtung $\vec{\Omega}'$ kommenden Strahlung angibt, der an den Blattflächen mit Flächennormalen $\vec{\Omega}_L$ in ein Raumwinkelement um $\vec{\Omega}$ gestreut wird.

Für die Modellierung wird der Bestand in diskrete Volumenelemente mit den Kantenlängen Δx , Δy und Δz eingeteilt. Die Anzahl der Zellen in jede Raumrichtung ist

durch $N_x = X_s/\ddot{A}x$, $N_y = Y_s/\ddot{A}y$ und $N_z = Z_s/\ddot{A}z$ gegeben. Diesen Zellen werden die Werte der Wechselwirkungskoeffizienten \acute{o} und \acute{o}_s zugeordnet, die als stückweise konstante Funktionen dargestellt werden. Innerhalb einer Zelle sind die Werte konstant. Die auf den Bestand treffende Strahlungsintensität wird in ihre direkten und diffusen Anteile zerlegt und diskreten Richtungen zugewiesen, wobei der Stand der Sonne mit berücksichtigt wird. Die Streuung wird beim direkten Strahlungsanteil in erster Ordnung berechnet. Ein 1D- Modell, das dem 3D- Modell vorgeschaltet wird, berechnet aus der über die x/y- Ebenen gemittelten Bestandesstruktur die Randbedingungen für das seitlich einfallende Licht.

2.5.2 Anpassung des Modells an den Versuchsbestand

Neben der Anpassung der Eingangsparameter wie Größe der Versuchsfläche, Maschengröße des Gitters, Blattflächendichte und spektrale Eigenschaften der Buchenblätter und Fichtennadeln mussten auch verschiedene Details des Programms angepasst werden. Das Modell berechnet aus der Blattflächendichte und den spektralen Eigenschaften der einzelnen Zellen den Photonentransport für verschiedene Wellenlängen und gibt als Ergebnis die 3D- Verteilung der Photonenflussdichte als integralen Wert aus. Das Programm ist dabei für einen Reinbestand ausgelegt, bei dem keine Differenzierung zwischen den spektralen Eigenschaften zweier Baumarten vorgenommen wird. Als Annäherung an den Fichten- Buchen- Mischbestand wurde als erste Näherung eine solche Differenzierung programmiert, wobei jeder Zelle neben der Blattflächendichte auch die Blattart mit als Parameter zugeordnet wird. Mit dieser Näherung wurden die Berechnungen durchgeführt, die als Grundlage für den Vergleich mit den Messergebnissen dienen.

2.5.3 Eingangsparameter für die Modellierung

Bestandesstruktur und Blattflächendichte:

Die Verteilung und Anordnung der Fichtennadeln wird in dem Göttinger Modell für den dort verwendeten Bestand durch ein Fichtenstrukturmodell errechnet (*Kranigk und*

Gravenhorst, 1993; Kranigk et al., 1994), das heißt, der Bestand wird auf Grund der vorhandenen Baumfußpunkte und verschiedener Baumklassen im Computer erstellt (*Knyazikhin et al., 1996*).

Der Versuchsbestand im Kranzberger Forst bei Freising ist als Teil der Parzelle 1 in der Wuchreihe Freising FRE 813 erfasst (*Kahn und Schütze, 1997*) und waldwachstumskundlich gut charakterisiert (*Pretzsch et al., 1998*). Die Versuchsfläche wurde mit Hilfe eines Modells durch *Grote (2000)* in Kuben mit der Kantenlänge 0,5 m eingeteilt und die Blattflächen $\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$ in Quadratmeter pro Kubus am Ort $(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$ bestimmt. Als Inputgrößen wurden dabei tatsächliche Durchmesser, Höhen, Standraumkoordinaten und Kronenradien aus der Aufnahme vom Herbst 1999 verwendet. Die daraus errechnete Blattflächendichteverteilung $\mathbf{u}_L(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$, die innerhalb jede Zelle (Volumen $\mathbf{V}_k = 0,125 \text{ m}^3$) als konstant angesehen wird, dient als Eingangsparameter für die Modellierung des Strahlungsfeldes. Es gilt:

$$u_L(x, y, z) = \frac{A(x, y, z)}{V_K} \left[\frac{m^2}{m^3} \right] \quad F - 12$$

Zur Darstellung der Blattflächendichte \mathbf{u}_L wird ein lokaler dimensionsloser Index eingeführt, der als $\mathbf{LAI}_l(\mathbf{x},\mathbf{y})$ bezeichnet wird (*Miessen, 1994; Kranigk et al., 1994*). Bei den hier gemachten Annahmen handelt es sich um die Summe aller $\mathbf{u}_L(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})$ in z-Richtung über dem Koordinatenpunkt (x,y) , die mit der z- Ausdehnung der Zellen (Gleichung F - 13) multipliziert wurden.

$$LAI_l(x, y) = \sum_{N_z} u_L(x, y, z) \cdot \Delta z \left[\frac{m^2}{m^2} \right] \quad F - 13$$

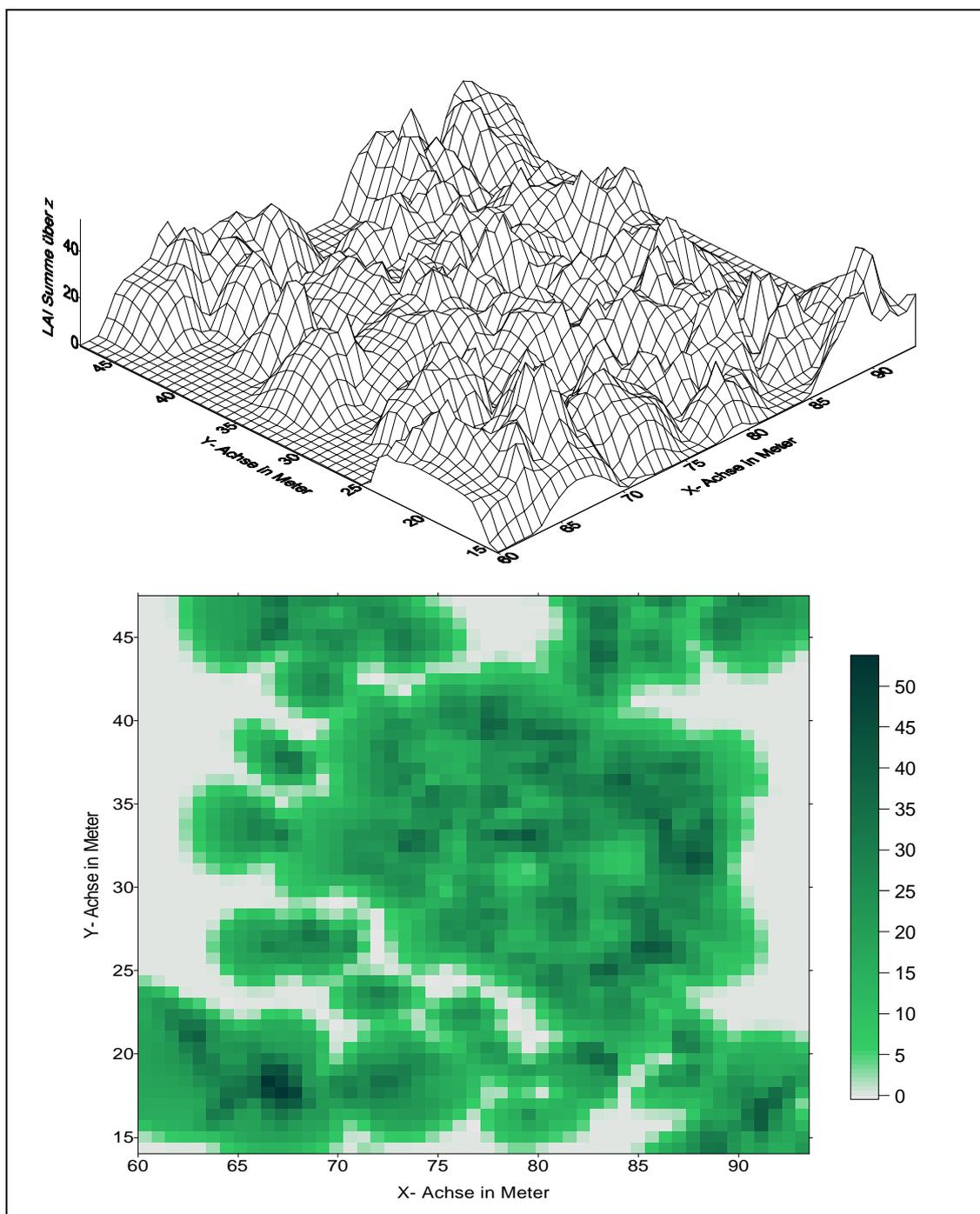


Abbildung 11: Lokaler, über die z- Achse summierter Blattflächenindex der modellierten Versuchsfläche. Die x- Achse bildet mit der Nordrichtung einen Winkel von ca. 100° . Der Koordinatenursprung liegt im Nullpunkt der Parzelle 1 der Wuchsreihe FRE 813 (Kahn und Schütze, 1997)(nach Grote, 2000).

Spektrale Eigenschaften der Buchenblätter und Fichtennadeln:

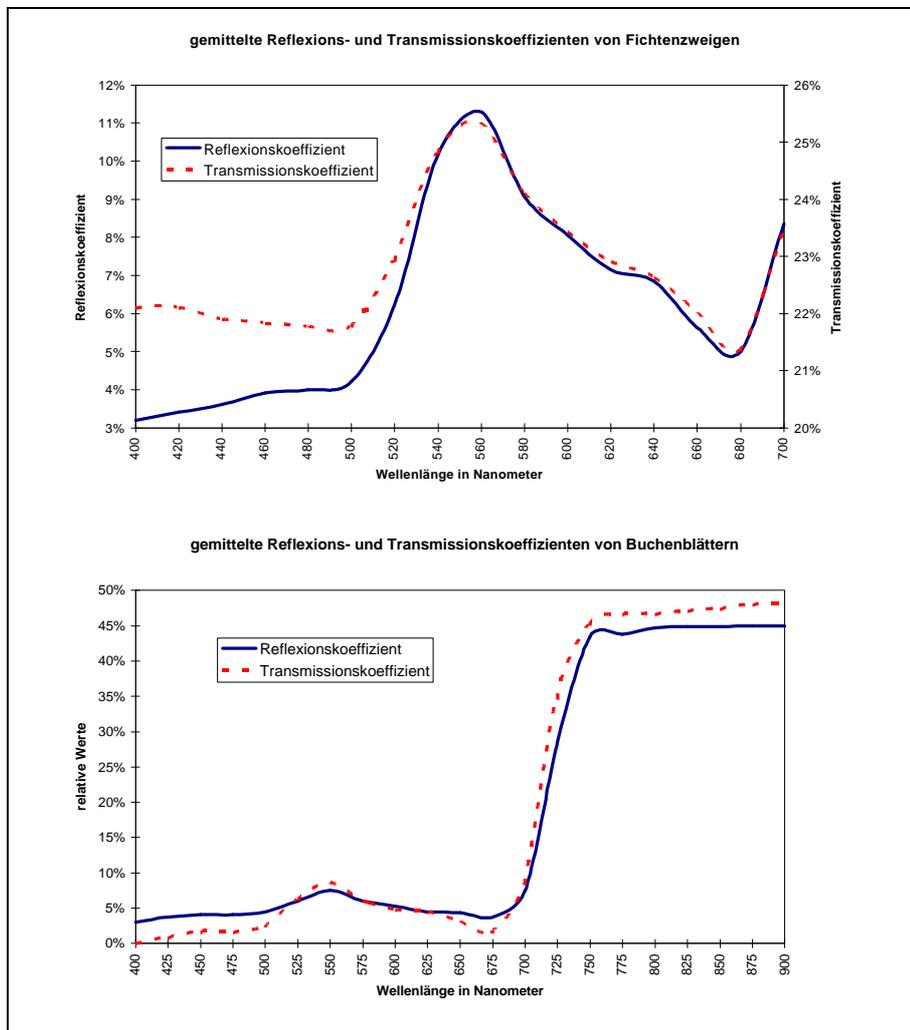


Abbildung 12: Mittlere Reflektions- und Transmissionskoeffizienten für Fichtenzweige und Buchenblätter (aus: Tanner und Eller 1985; Miessen, 1994).

Die spektralen Eigenschaften der Fichtenzweige sind sowohl von der Lage (Sonneneinstrahlung bzw. Schattenkrone) als auch vom Nadelalter abhängig (Daughtry et al., 1989; Williams, 1991; Miessen, 1994; Knyazikhin et al., 1996, 1997; Middleton et al., 1997; Panfyorov, 1998). Vergleichbare Beobachtungen machten Eller et al., (1981) sowie Tanner und Eller (1985), als sie die Reflektion (R), Transmission (T) und Absorption (A) von Buchenblättern während einer ganzen Vegetationsperiode untersuchten. Diese Untersuchungen wurden als Basis für die durchgeführte Modellierung verwendet, wobei das Strahlungsfeld für ausgesuchte Tage der Monate August bis Oktober 1999 modelliert wurde. Typische Verläufe von mittleren

Transmissions- und Reflektionseigenschaften sind für Fichtenzweige und Buchenblätter in Abbildung 12 als relative Werte angegeben. Der Relativwert der Absorption ergibt sich dabei zu:

$$A = 1 - (T + R)$$

F - 14

Die Eingangsdaten der Strahlung:

Der als Eingangsparameter für das Modell benötigte Strahlungsinput der diffusen und der globalen Himmelsstrahlung wird an einem Messturm in 30 m Höhe über dem Bestand gemessen. Der direkte Strahlungsanteil wird aus diesen Größen errechnet. Die globale PAR wird sowohl über dem Bestand als auch in verschiedenen Höhen unter dem Bestand ermittelt, wobei auch die vom Boden reflektierte PAR mit erfasst wird. Die Helligkeitsverteilung am Himmel wird an klaren Tagen (Clear Sky, CS) mit der von *Pokrowski (1929)* ermittelten Formel errechnet. Bei bewölktem Himmel wird mit der Näherung des SOC (Standard Overcast Sky)(*Moon und Spencer,1942*) gearbeitet. Aus diesem Grund werden im Ergebnisteil speziell die klaren Tage und die Tage mit stark bewölktem Himmel für die Auswertung herangezogen.

3 Entwicklung eines neuartigen Messsystems

3.1 Beschreibung der einzelnen Komponenten der Messapparatur

Das Herzstück der Messapparatur bildet das **Multi- Channel- Spektrometer- Modul** (MCS- Modul), das als kompakte und lichtsensible Einheit auf einer X-Y-Positionierungsmechanik montiert ist, welche mittels zweier Servomotoren angetrieben wird, deren Positioniergenauigkeit bei 0,01 mm liegt. Die Ansteuerung dieser Servomotoren erfolgt über Leistungsverstärker der Firma Seidel und einer Ansteuerung auf Transputer- Basis. Die Lichtinformation wird über speziell konfektionierte Lichtwellenleiter vom Messort (Bestandesinneres) zum MCS- Modul geleitet. Die Enden der Lichtwellenleiter sind dabei ortsfest mit einer Haltevorrichtung an der Positionierungsmechanik verbunden, damit das MCS- Modul genau unter den Lichtwellenleitern justiert werden kann. Die Ansteuerung, Kalibrierung, Messung und Auswertung erfolgt durch speziell entwickelte Softwareprogramme, da nur Module für die Hardwareansteuerung zur Verfügung standen. Die gesamte Software wurde dabei in der Programmiersprache Delphi 1.0 entwickelt.

3.1.1 Das Multi- Channel- Spektrometer- Modul (MCS- Modul)

3.1.1.1 Aufbau und Leistungsdaten des MCS- Moduls

Ein klassisches Spektrometer beziehungsweise ein klassischer Monochromator besteht typischerweise aus einem dispersiven Medium, Ein- und Ausgangsspalt sowie abbildenden Elementen, die einen parallelen Strahlengang erzeugen. Zur Aufnahme eines Spektrums muss ein Detektor hinter dem Austrittsspalt das Licht sequenziell aufnehmen, während das disperse Element oder der Ausgangsspalt bewegt wird. Eine solche mechanische Bewegung benötigt Zeit und ist störanfällig.

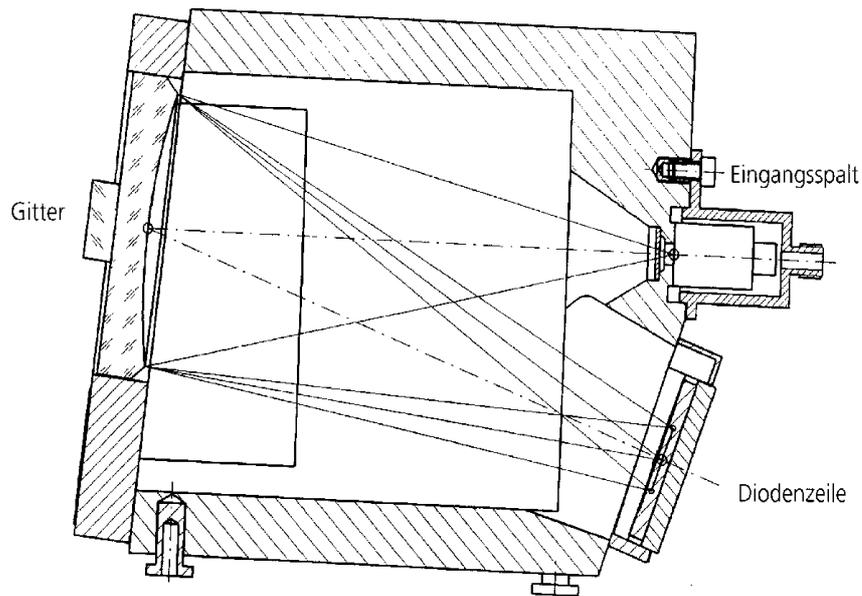


Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Multi- Channel- Spektrometermoduls.

Bei dem verwendeten Multi- Channel- Spektrometer- Modul (MCS- Modul) der Firma Zeiss (Abbildung 13) wurde dies auf andere Art gelöst. Das MCS- Modul besteht aus einem Faserstecker für die Lichtzuführung, einem Eingangsspalt, einem Gitter und einer Diodenzeile (1024 Einzeldioden), die an der Stelle des Austrittsspalts positioniert ist. Die Diodenzeile, die den Austrittsspalt ersetzt, ermöglicht die simultane Erfassung eines kompletten Spektrums in Sekundenbruchteilen. Neben der schnellen Erfassung des gesamten Spektralbereiches kann durch den Einsatz einer Diodenzeile außerdem auf bewegliche Bauteile verzichtet werden. Das abbildende, konkave Gitter dient als dispersives Element und macht darüber hinaus Linsen und Hohlspiegel für die Strahlbündelung überflüssig. Alle Bauteile sind fest miteinander verklebt und bilden einen quasi "monolithischen" Baustein, der robust und dauerjustiert ist (*Zeiss Produktinformation*). Von der Firma Zeiss werden mehrere MCS- Module angeboten, die unterschiedliche Spektralbereiche abdecken. In Tabelle 3 sind die Spezifikationen des MCS- Moduls (MCS UV-NIR) zusammengefasst, das bei dieser Messapparatur eingesetzt wurde.

Tabelle 3: Die Spezifikationen des Multi- Channel- Spektrometer- Moduls MCS UV-NIR (Carl Zeiss Produktinformation).

Abmessungen BxTxH[mm]	140x105x75
Gewicht [g]	ca. 600
Spektralbereich [nm] max.	190 bis 1020
Spektralbereich [nm] spezifiziert	253 bis 912
Anzahl der Dioden im Array	1024
Wellenlängenauflösung [nm/Pixel]	ca. 0,8
Absolute Genauigkeit [nm]	0,3
Reproduzierbarkeit [nm]	< 0,1
Temperaturabhängigkeit [nm/K]	< 0,005

Der Eingangspalt des MCS- Moduls ist speziell für den Anschluss eines Lichtwellenleiters mit SMA- Normverschraubung konzipiert. Da aber die spektrale Information sehr vieler Messstellen erfasst werden musste, wurde von der Firma Zeiss ein spezieller Faseradapter entwickelt. Dieser Adapter (Abbildung 14) besteht aus einem Mantel aus Edelstahl, in dessen Kern ein Quarzlichtwellenleiter geführt wird. Die Enden dieser Quarzfasern wurden plan poliert.

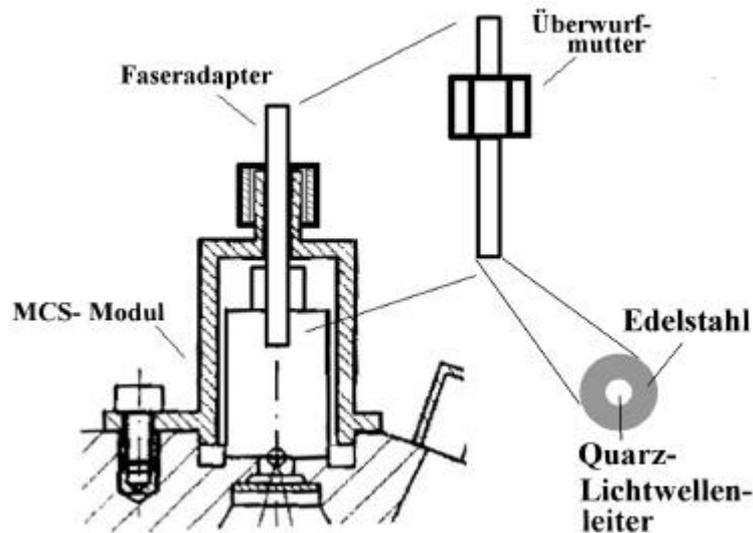


Abbildung 14: Faseradapter zur optimalen Lichteinkopplung in das MCS- Modul.

3.1.1.2 Elektronischer Aufbau und Ansteuerung des MCS UV-NIR- Moduls

Das MCS UV-NIR- Spektrometermodul ist mit einer Silizium-Diodenzeile (Diodenarray) vom Typ S3904-1024Q der Firma Hamamatsu mit 1024 Pixeln ausgerüstet (Abbildung 15).

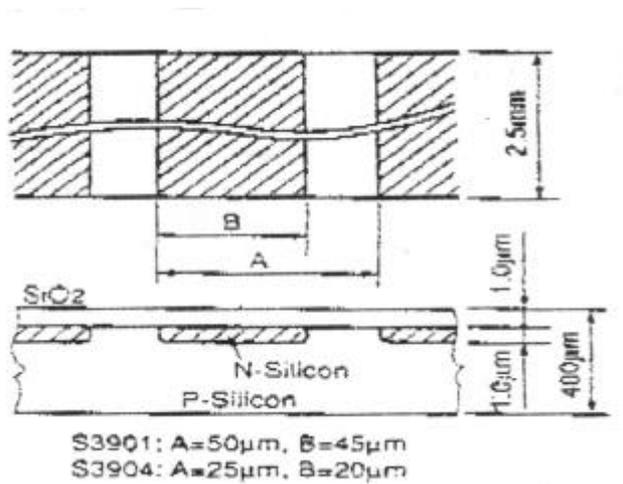


Abbildung 15: Schemazeichnung einer Hamamatsu- Diodenzeile, wie sie im MCS UV-NIR- Modul eingesetzt wird.

Sie besteht aus P- dotiertem Silizium, in dem N- dotiertes Silizium (N- Pixel) von einer Größe von 25µm x 2500µm eingebracht wurde. Die einzelnen N-Pixel einer Diodenzeile, die Kondensatoren darstellen, werden dabei durch auftreffendes Licht entladen. Das zeitliche Integral über dem Ladestrom bei jedem einzelnen Pixel verläuft proportional zur Lichtintensität. Durch einen Startimpuls wird die Ladeinformation der N- Pixel simultan in ein Schieberegister übertragen und diese Werte dann mit einer Lesefrequenz von 10 MHz sequenziell ausgelesen. Wird ein weiterer Start- Impuls gegeben, so wird die Ladeinformation der einzelnen Pixel wieder in das Schieberegister geladen und die N- Pixel erfahren ein Reset. Die Lichtsammelzeit, im Weiteren auch Integrationszeit genannt, ist damit die Zeit zwischen zwei Start- Impulsen. Während das Schieberegister ausgelesen wird, darf kein Startimpuls gegeben werden, da die Messung dadurch verfälscht würde. Für die hier eingesetzte Elektronik ergibt sich für 1024 Pixel eine minimale Integrationszeit von 16 ms.

Das MCS -Modul ist mit einer Vorverstärker-Elektronik ausgerüstet, die direkt auf dem Hamamatsu- Baustein aufsetzt. Der eingebaute Zeiss-Vorverstärker gewährleistet eine

rauscharme Verstärkung des Videosignals auf $3 V_{SS}$ und die Anpassung der TTL-Pegel für das Zeilenmanagement auf die für die Diodenzeile nötigen Pegel.

Zur Ansteuerung und zum Auslesen der Diodenzeile wird eine Frontendelektronik (FEE-003-Vx) benötigt, die gleichzeitig auch die analoge/digitale Wandlung durchführt. Dabei werden sowohl die Steuersignale für das MCS- Modul generiert als auch die Ladeinformationen aus dem Schieberegister integriert und mittels 15- Bit Analog/Digital- Wandlung als Low/High- Byte zur Verfügung gestellt.

Die Verbindung von der Frontendelektronik zum PC wird über eine 16-Bit ISA Einsteckkarte (PD-ISA16V3, tec5 Sensorik und Systemtechnik GmbH) realisiert. Mit Hilfe dieser Einsteckkarte werden die Befehle und Daten des Messerfassungsprogramms an die Frontendelektronik weitergeleitet, eine Messung initiiert und ausgewertet sowie die Messdaten in den PC- Speicher übermittelt.

3.1.2 Aufbau der Positionierungsmechanik

3.1.2.1 Die Komponenten der Positionierungshardware

Zur Aufnahme des in Kapitel 3.1.1 beschriebenen MCS- Moduls musste eine Positionierungsmechanik verwendet werden, die sowohl das relativ schwere MCS- Modul aufnehmen kann als auch eine sichere Positionierung und exakte Wiederholbarkeit gewährleistet. Durch speziell dafür ausgelegte Spindelantriebe mit Kugelgewindetrieb, die durch Linearmotoren getrieben werden, konnte eine X-Y- Positionierung mit einer Genauigkeit von 0,01 mm erzielt werden.

Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau der Positionierungsachsen. Dabei wurden für den Fahrweg in X- Richtung zwei parallel laufende Achsen verwendet, die über einen Zahnriementrieb miteinander verbunden sind.

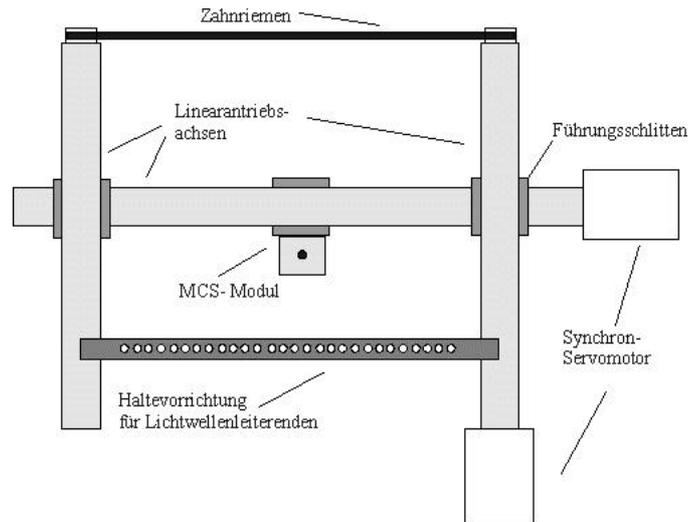


Abbildung 16: Schema der Positionierungsachsen mit Linearmotoren.

Eine der beiden Achsen wird dabei aktiv durch einen Servomotor angetrieben. Senkrecht zu diesen Achsen ist ein weiterer Lineartrieb (Y- Richtung) fest montiert, auf dem das MCS- Modul befestigt wurde. Beide Achsen werden durch jeweils einen Synchron-Servomotor vom Typ 6SM37S angetrieben. Das X-Y- Achsensystem wurde mit induktiven Endsaltern und der Haltevorrichtung für die Lichtwellenleiter in eine stabile Rahmenkonstruktion integriert.

Zur Ansteuerung der beiden Synchron-Servomotoren kamen zwei digitale Servoregler der Firma Seidel (digifas® 7201) zum Einsatz, die speziell für den Antrieb und die Regelung von Motoren der Baureihe 6SM konzipiert sind.

Durch die Vorgabe eines Soll- Wertes, der durch die PC- Steuerung angelegt werden kann, wird der angeschlossene Motor gemäß der gegebenen Voreinstellungen in Gang gesetzt und an die gewünschte Position gefahren. Dabei wird die momentane Motorposition (Ist- Wert) erfasst und mit dem Soll- Wert verglichen. Der Servoregler verfügt auch über spezielle Anschlussmöglichkeiten für Signale und Schalter (Abbildung 17), die bei der Kommunikation zwischen Steuerprogramm und Servoregler während des Betriebes eingesetzt werden können.

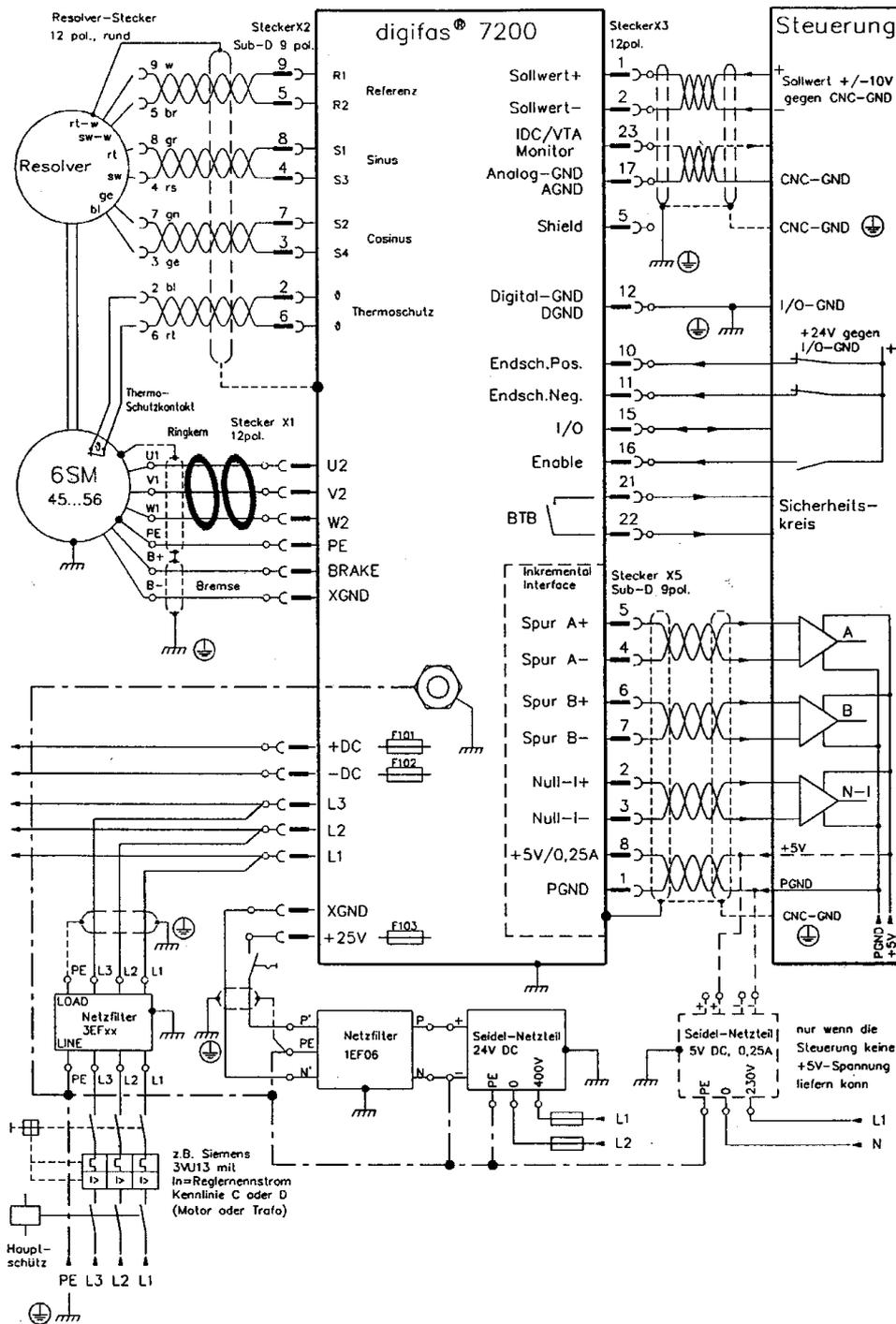


Abbildung 17: Anschlussplan des digifas[®] 7201; digitaler Servoregler zur Ansteuerung von Synchron-Servomotoren der Baugruppe 6SM (Montageanleitung, Seidel Antriebs-Systeme).

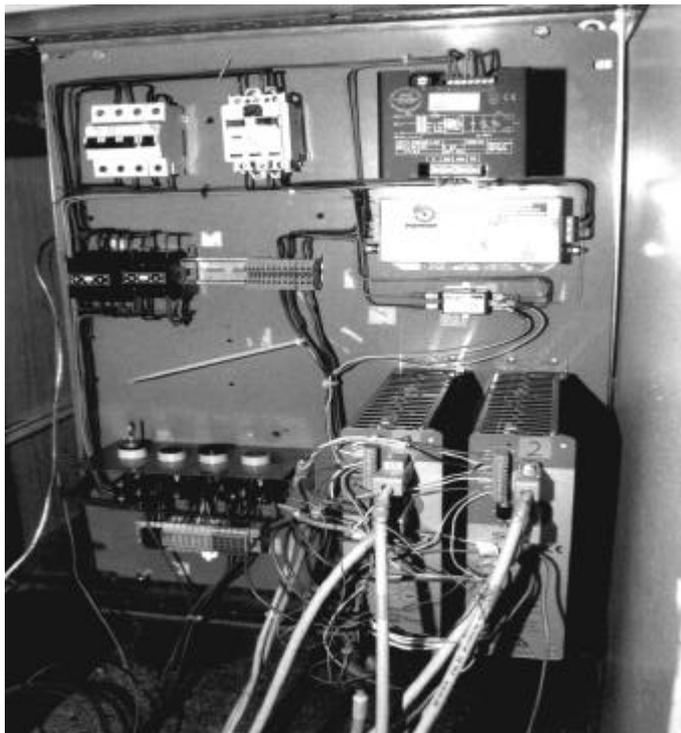


Abbildung 18: Verdrahtung der digitalen Servoregler gemäß Anschlussplan (Foto: Reitmayer Karin).

Der Enable- Eingang dient beispielsweise dazu, sicherzustellen, dass die Mechanik erst dann aktiviert werden kann, wenn die Messwerterfassung beziehungsweise die Positionssteuerung in Betrieb ist. Über den BTB- Kontakt (Betriebsbereitschafts-Kontakt) kann dann festgestellt werden, ob der Servoregler betriebsbereit ist. Sind die Endschalter konfiguriert und angeschlossen, so werden beim Erreichen einer Endposition die Motorbewegungen sofort gestoppt, was einer Beschädigung der Mechanik vorbeugt. Abbildung 18 zeigt die tatsächliche Anschlussverdrahtung der Positionssteuerung, die als Schütz- Schaltung realisiert wurde.

3.1.2.2 Ansteuerung der Positionierung

Für die Ansteuerung der Servomotoren und die Auswertung der Positionsdaten und Endschalter wurde eine universelle Positionier- und Bahn-Steuerung für Werkzeugmaschinen beziehungsweise Roboter verwendet. Mit der MCU-3T (Motion-Control-Unit für drei Achsen), die als Einsteckkarte für IBM-AT- kompatible Rechner konzipiert ist, können Bewegungsabläufe und Prozessabläufe automatisiert werden. Die MCU-3T stellt dabei für drei Achskanäle ein eigenes CPU-System auf Transputer-Basis

zur Verfügung. Transputer sind spezielle auf parallele Verarbeitung konzipierte Mikro-Computer. Der große Vorteil eines eigenen CPU- Systems für die Achsansteuerung ist die Möglichkeit der parallelen Programmverarbeitung. Die MCU-3T- Einsteckkarte erhält dabei Steuersignale beziehungsweise Befehle vom PC (Personalcomputer), die dann eigenständig ausgewertet und bearbeitet werden. Ist der Befehl ausgeführt, wird dies dem PC über vorher spezifizierte Eingangskanäle mitgeteilt. Durch diese Möglichkeit der Befehlsverarbeitung ist der PC, auf dem das eigentliche Messprogramm läuft, nicht durch Steueraufgaben blockiert und kann somit notwendige Aufgaben parallel ausführen. Für diese Art der Programmierung stehen Befehlssammlungen in verschiedenen höheren Programmiersprachen (Turbo Pascal, C, Delphi) zur Verfügung. Die MCU-3T ermöglicht darüber hinaus die Ausführung von bis zu vier parallel ablaufenden Steuer- beziehungsweise Kontrollprogrammen, so genannte CNC- Tasks (CNC = Computerized Numerical Control), die in den Speicher der Einsteckkarte geladen und ausgeführt werden können. Diese Tasks werden durch die so genannte Standalone- Applikations- Programmierung (SAP) erzeugt. Sofern eine Synchronisation zwischen einem PC-Anwenderprogramm und dem MCU-3T- Standalone- Programm notwendig ist, kann dies mit Hilfe vordefinierter System-Variablen, auf welche beide System-Partner (PC und MCU-3T) zugreifen können, durchgeführt werden.

Ein weiterer unabhängig ablaufender Task ist der Rampen- und Interpolations- Task, bei dem die einzelnen Motoren mit definierten Beschleunigungen und Maximalgeschwindigkeiten in eine gewünschte Zielposition gebracht werden. Die notwendigen Berechnungen des Fahrprofils werden dabei durch das MCU-3T erledigt.

Die Konfiguration der Eingangsschnittstellen, des Endschalerverhaltens, der Servomotorenart, der Fahrprofile und der verwendeten Achsen muss durch ein eigenes Konfigurationsprogramm (mcfg.exe) ausgeführt werden. Ein weiterer Vorteil des MCU-3T ist das Verhalten bei auftretenden Fehlern. Wurde beispielsweise ein Eingang der Steckkarte mittels mcfg.exe so konfiguriert, dass er einen induktiven Endschalter betreibt, dann wird beim Erreichen einer Endposition die Motorenbewegung automatisch angehalten. Dadurch werden Beschädigungen der Mechanik verhindert. Der Fehler wird automatisch über eine spezielle Kodierung an das ausführende Programm am PC gemeldet, das darauf entsprechend reagieren kann. Die Signal- und Ansteuerleitungen wurden speziell angefertigt und mit dem 50-poligen SUB-D Steckverbinder des MCU-3T verbunden. Für nähere Angaben zur Programmierung und

Installation sei hier auf das Bedienerhandbuch und das Programmierhandbuch des MCU-3T verwiesen.

3.1.3 Lichtwellenleitersensoren mit einer speziellen Lichteinkopplung

3.1.3.1 Beschreibung der verwendeten Lichtwellenleiter

Für den Lichttransport vom eigentlichen Messort im Bestand zum zentral gelegenen Spektrometer wurden speziell konfektionierte Lichtwellenleiter- Sensoren entwickelt und angefertigt. Dabei kamen zwei Lichtwellenleitertypen zum Einsatz, die sich in ihren Dämpfungs- und Verarbeitungseigenschaften deutlich voneinander unterscheiden.

Sensortyp 1 besteht aus einem Optran PWF- Lichtwellenleiter (Quarzglasfaser) der Firma CeramOptec, Sensortyp 2 aus einem Kunststoffmaterial. Die Lichteinkopplung in den Lichtwellenleiter und die Befestigung an der Haltevorrichtung im Messwagen wurde bei beiden Sensortypen gleich gewählt.

Beide Lichtwellenleitertypen sind Stufenindex - LWL, die, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, bessere Lichttransporteigenschaften als Lichtleiter mit Gradientenindex aufweisen. Außerdem sollten für den Transport von „weißem“ Licht möglichst viele Wellentypen transportfähig sein, damit Moden- Effekte keine Rolle spielen. Die dazu notwendige relativ große Querschnittsfläche hat für die Handhabung der Signalweiterleitung auch einen enormen Vorteil, da bei großem Querschnitt eine höhere Lichtintensität transportiert und damit die Einkopplung und Weiterleitung des Lichtes erheblich besser realisiert werden kann (*Kersten, 1977*). Quarzglas- LWL haben im betrachteten Spektralbereich sehr gute Dämpfungseigenschaften, sind aber gerade bei größeren Kerndurchmessern sehr teuer.

Die LWL Optran PWF haben als Kernmaterial Quarzglas mit einer Silikonumhüllung. Der gewählte Kerndurchmesser der Faser beträgt 600 µm. Da sich das Material nur sehr schwer bearbeiten lässt, wurden jeweils 30 m lange Lichtwellenleiter ab Werk konfektioniert, das heißt, die Enden der LWL wurden von der Firma plan geschliffen. Als zusätzlicher Schutz gegen Umwelteinflüsse wurde noch eine PVC (Polyvinylchlorid)- Umhüllung lose auf die Faser geschoben.

Die Kunststoff- LWL POF der Firma Ratioplast- Electronics bestehen aus einer 0,98 mm dicken Kernfaser aus PMMA (Polymethylmetacrylat) und einer 0,01 mm

starken Ummantelung. Die Ummantelung, die gleichzeitig als Zugentlastung dient, besteht aus Polyethylen mit einem Durchmesser von 2,2 mm. Der große Vorteil des Kunststoff-LWL liegt nicht nur in seinem günstigen Preis, sondern vor allem in der guten Bearbeitbarkeit. So können die POF- Fasern auf die gewünschte Länge gebracht und die Enden mit einer eigens konstruierten Poliervorrichtung plan geschliffen werden.

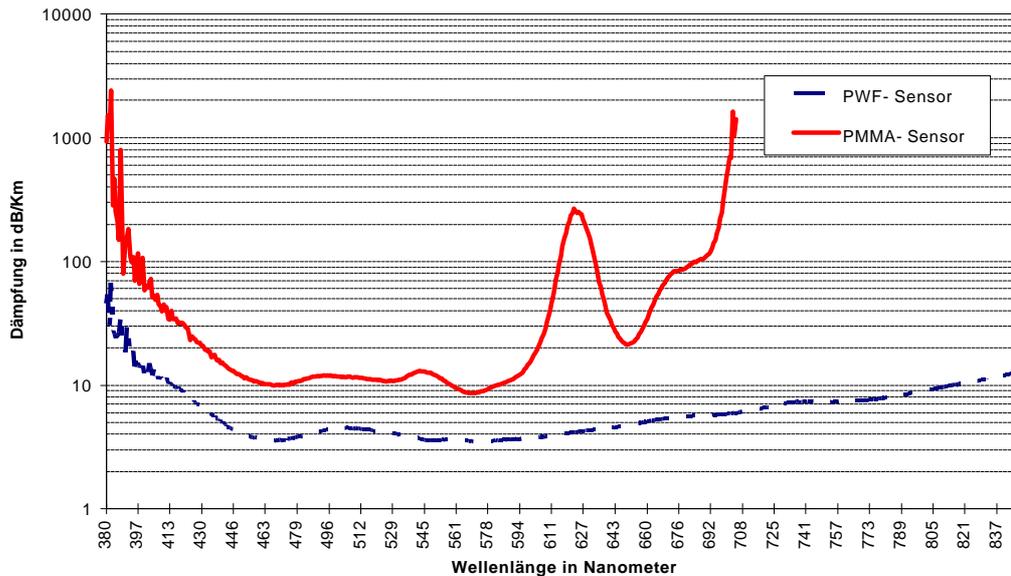


Abbildung 19: Spektrale Dämpfungscharakteristik der beiden Lichtwellenleitertypen PWF (Glasfaser) und POF (Kunststofffaser).

In Abbildung 19 sind die spektralen Dämpfungscharakteristiken der beiden Lichtwellenleitertypen dargestellt. Die relativ hohe Dämpfung des Lichtsignals beim Kunststoff- LWL bei einer Wellenlänge von etwa 625 nm beschränkt die Länge dieser Sensoren auf circa 40 m. Wird diese Länge überschritten, steigt die Absorption innerhalb des LWL so stark an, dass eine aussagekräftige Messung nicht mehr möglich ist. Oberhalb von 700 nm können mit der POF- Faser nur Messungen bis zu einer Länge von etwa 10 bis 15 m durchgeführt werden. Der Glasfaser- LWL zeigt dagegen im gesamten betrachteten Spektralbereich gute Transmissionseigenschaften. In Tabelle 4 sind die wichtigsten Merkmale der verwendeten Lichtwellenleiter aufgeführt.

Tabelle 4: Eigenschaften der beiden verwendeten Lichtwellenleitertypen PWF (Quarzglas) und POF (Kunststoff).

Bezeichnung	POF	PWF
Material Kern	PMMA	Quarzglas
Material Umhüllung	Polyethylen	PVC
Numerische Apertur NA	0,47	0,3
Temperaturbereich [°C]	-25 - 85	-40 - 150
Durchmesser:		
Kern [mm]	0,98	0,6
Umhüllung [mm]	0,02	0,02
Mantel [mm]	2,2	0,8
Min. Biegeradius [cm]	5	10
Sensorkopf:		
Material	POM	POM
Durchmesser [mm]	10	10
Bohrtiefe [mm]	4,6	4,6

3.1.3.2 Lichteinkopplung und Befestigung der Lichtwellenleiter

Jeder Lichtwellenleiter besitzt einen maximalen Öffnungswinkel. Licht, das unter einem größerem Winkel zur achsparallelen Richtung einfällt, wird nicht weitergeleitet, da die Voraussetzungen für die Totalreflektion innerhalb des Lichtwellenleiters nicht mehr gegeben sind (siehe Kapitel 2.4). Soll ein größerer Winkelbereich erfasst werden, muss ein diffuser Aufsatz, der Licht mindestens in den Grenzwinkelbereich streut, an dem Lichtwellenleiter angebracht werden. Ein solcher Diffusorkopf sollte auch möglichst wenig Gewicht haben, damit die LWL- Enden keinen zu großen Beanspruchungen ausgesetzt werden. Als ideales Material haben sich Kugelaufsätze aus POM (Polyoximethylen), einem milchig-weißen Material, herausgestellt.

Diese geschliffenen 10 mm Vollkugeln wurden mit einer Bohrung versehen, deren Tiefe empirisch zu 4,6 mm bestimmt wurde. In diese Bohrung wurden die jeweiligen Lichtwellenleiterenden eingeklebt. Durch diese Anordnung konnte eine nahezu

winkelunabhängige Lichteinkopplung verwirklicht werden, das heißt, Licht aus fast allen Raumrichtungen kann mit der gleichen Empfindlichkeit gemessen werden.

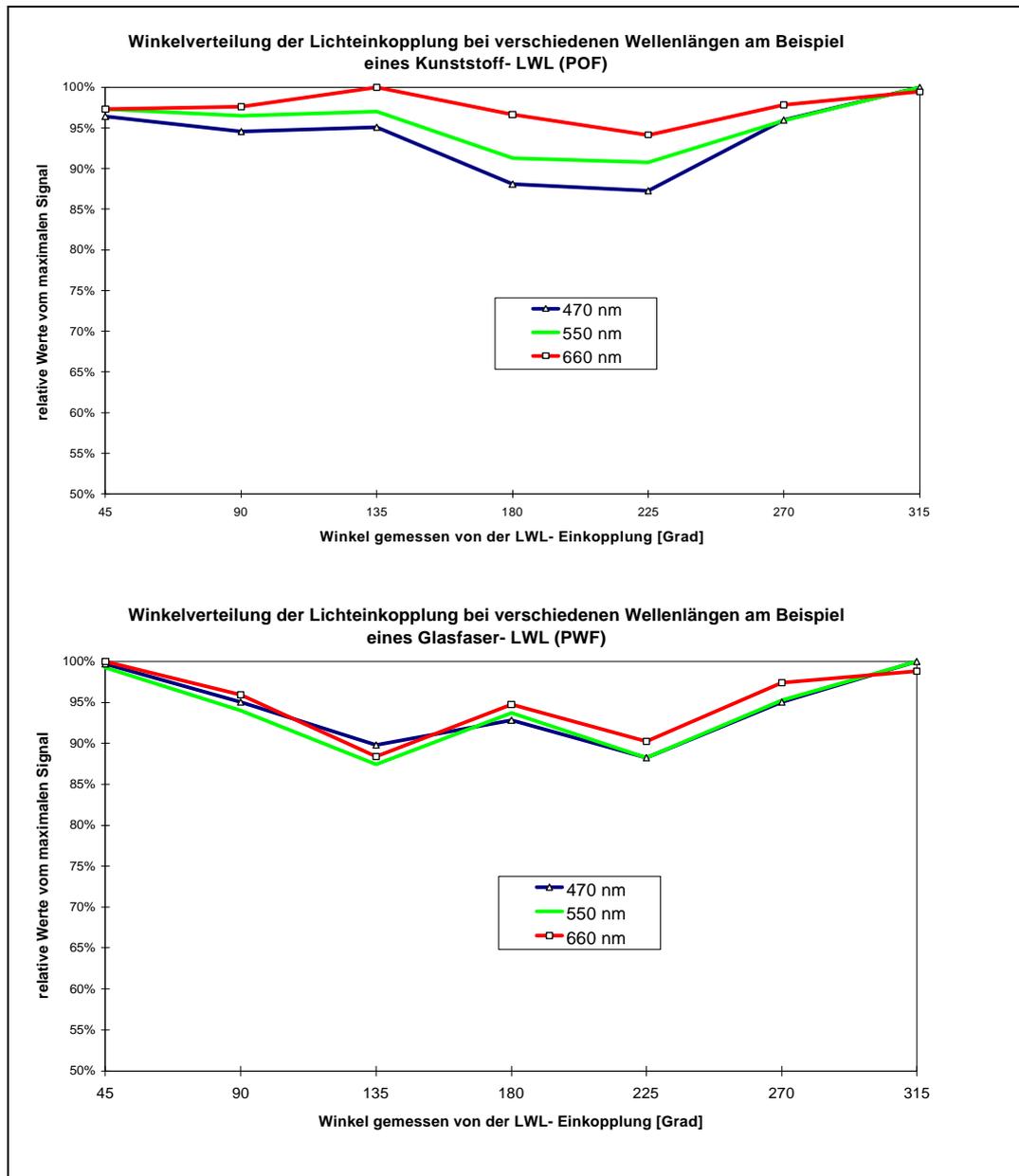


Abbildung 20: Abhängigkeit des Lichtsignals von der Einstrahlungsrichtung, dargestellt für die verwendeten Lichtwellenleiterarten; bei 0° ist der LWL in die Kugel eingeklebt, bei 180° wird in gedachter Linie direkt in den LWL eingestrahlt.

In Abbildung 20 ist die winkelabhängige Lichteinkopplung der beiden LWL-Sensortypen jeweils für drei Wellenlängen angegeben. Dabei zeigt sich, dass die

Richtungsabhängigkeiten bei den drei ausgewählten Wellenlängen keine signifikanten Unterschiede zeigen. Die Symmetrieabweichungen sind vermutlich durch die Verarbeitung (POF- Faser) und durch Einpassungsfehler beim Einkleben der LWL in den Diffusorkopf bedingt.

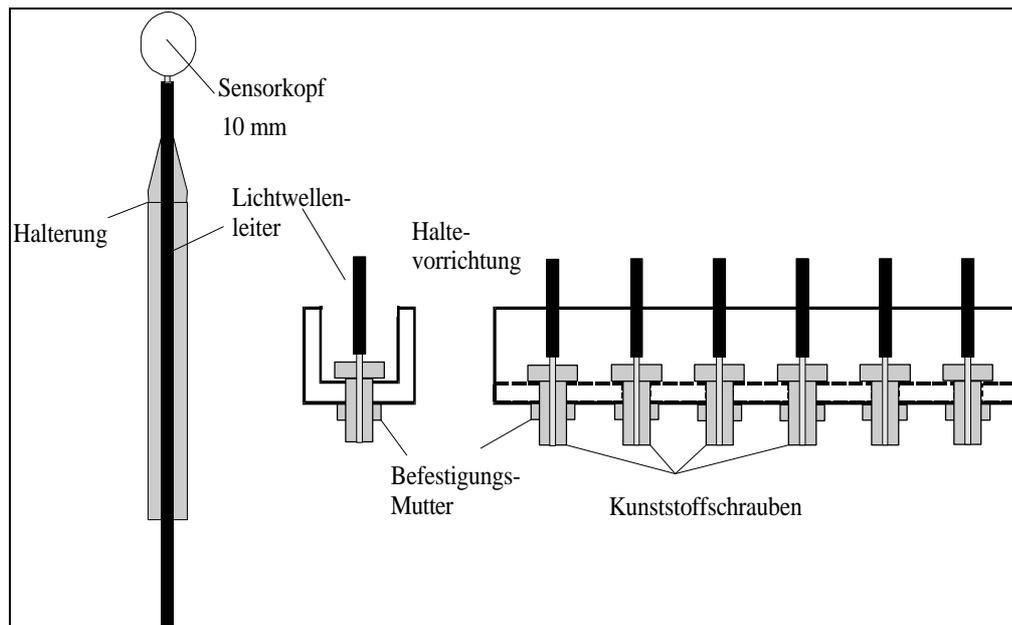


Abbildung 21: Schemazeichnung der Sensorbefestigungen sowohl im Bestand als auch an der Haltevorrichtung.

Am anderen Ende wurden die LWL für die Befestigung an der Haltevorrichtung der Positionierungsmechanik mit einer Kunststoffschraube (5 mm Durchmesser) verklebt (Abbildung 21). Dazu wurden die Schrauben achsparallel durchbohrt und exakt auf 20 mm abgelängt. Diese LWL- Halteschrauben wurden mit Kunststoffmuttern an der Haltevorrichtung montiert und mit Klebstoff fixiert.

Die Unterscheidung der beiden Sensortypen bei der Auswertung und der Kalibrierung wird durch die jeweils einem Sensor zugewiesene Sensornummer erleichtert. Die Nummerierung der Sensoren setzt sich dabei aus einer Gruppennummer N_G und einem Gruppenindex N_I zusammen (F - 15).

$$S = N_G * 10 + N_I$$

F - 15

$N_G \in \mathbb{N}$

$N_I = 0$ Glasfaser- LWL

$1 \leq N_I \leq 4$ Kunststoff- LWL

3.2 Aufbau und Konzeption der Strahlungskalibrierung

Die Strahlungskalibrierung stellt eine besondere Herausforderung dar, da einerseits Umgebungsbedingungen wie Verdunkelung und Temperaturkonstanz auf die Konstanz der Normstrahlungsquelle Einfluss nehmen und andererseits diese Normquellen einem Alterungsprozess unterliegen. Neben kleinen Schwankungen in der Strom- und Spannungsversorgung spielt bei nicht parallel geführten Strahlengängen auch die Entfernung des Sensors von der Strahlungsquelle eine wichtige Rolle. Absolutgenauigkeiten in der Bestrahlungsstärke mit einem Fehler unter 10 % sind dabei kaum zu erreichen. Auch der hier verwendete Kalibrator vom Modell SRC der Firma Instrumentation Specialities Company Inc., der als Normstrahlungsquelle eine Tungsten- Standardlampe enthält, erlaubt keine höhere absolute Genauigkeit.

Da hier sehr viele Messsensoren miteinander verglichen werden mussten und daher die relative Genauigkeit der einzelnen Sensoren untereinander von entscheidender Wichtigkeit war, musste ein spezielles Kalibrierkonzept entwickelt werden. Zu diesem Zweck wurden Norm- beziehungsweise Vergleichssensoren gefertigt, die den Messsensoren als Standard dienten. Die absolute Energie- beziehungsweise Bestrahlungsstärkekalibrierung der Messsensoren wurde über diese Normsensoren bestimmt. Der Kalibrierfaktor aus Normsensor und Messsensor kann somit mit jeder zeitlich konstanten Strahlungsquelle ermittelt werden, wenn diese im geforderten Spektralbereich liegt. Zur Bestimmung der Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Messsensoren müssen dann nur noch die Normsensoren sehr genau charakterisiert werden.

3.2.1 Dunkel- und Offset- Korrektur

Die gemessene Lichtinformation muss für eine genaue Auswertung noch verschiedenen Korrekturen unterzogen werden, um das eigentliche Messsignal zu bestimmen. Dazu werden zwei Messungen bei einer Lichtintensität mit verschiedenen Integrationszeiten (1 s, Messsignal und 50 ms, Referenzsignal) durchgeführt und daraus über eine lineare Extrapolation das theoretische Signal bei einer Integrationszeit von 0 ms errechnet. Für die „Dunkel- Korrektur“ wird dieser theoretische Wert vom Messsignal (Integrationszeit 1 s) abgezogen.

Eine weitere Korrektur des Signals besteht aus der Offset- Korrektur, die durch die Messelektronik bedingt ist. Dazu wird eine Fit- Funktion errechnet, mit deren Hilfe der Offset- Wert vom Messsignal abgezogen werden kann. Abbildung 22 zeigt das Spektrum der Normlampe, das mit einem Normsensor gemessen wurde. Das Rohsignal, das heißt, das Signal ohne Korrekturen, sowie das Signal mit Dunkel- und Offset- Korrektur sind in der Grafik dargestellt.

Alle Kalibrierungen wurden mit einer einheitlichen Integrationszeit für das Messsignal (1 s) und das Referenzsignal (50 ms) durchgeführt. Diese Zeiten werden auch bei der Messung im Freiland als Standard verwendet.

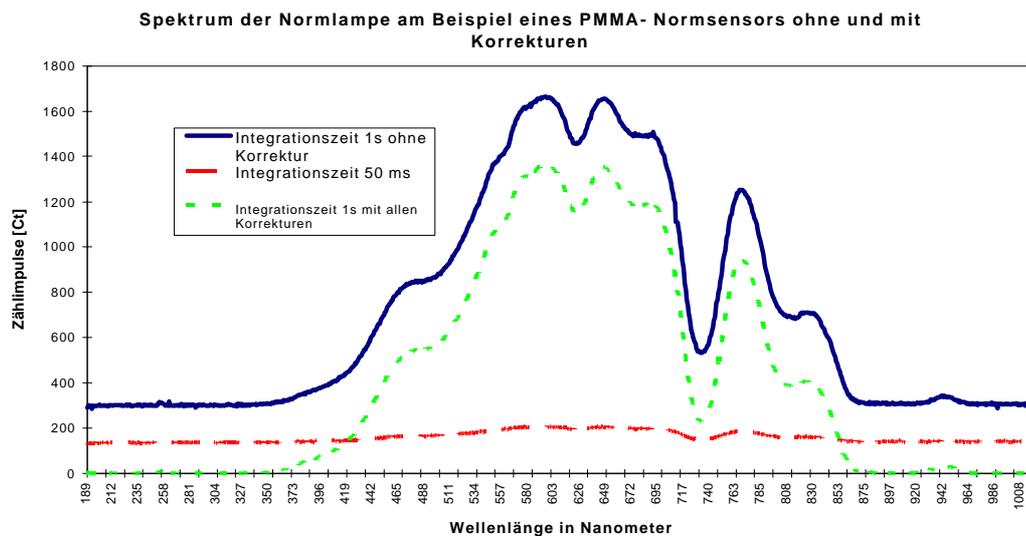


Abbildung 22: Messsignal eines Referenzsensors mit den Integrationszeiten von 1 s und 50 ms sowie Signal nach Dunkel- und Offset- Korrektur.

3.2.2 Dämpfung und Normsensoren

Die Messsensoren wurden wie für den normalen Messbetrieb an der Haltevorrichtung der Positioniermechanik montiert und die Position justiert. Dadurch konnte die gesamte Sensorstrecke von der Einkopplung des Lichtes über dessen Transport im Lichtwellenleiter bis hin zur Messung durch das MCS- Modul mit berücksichtigt werden. Drei Normsensoren wurden so konfektioniert, dass sie die gleiche Lichteinkopplungsgeometrie wie die Messsensoren aufweisen. Die Normsensoren wurden schließlich gegeneinander kalibriert, damit bei Bedarf weitere Normsensoren hergestellt werden konnten, die dann bei der Messauswertung verwendet wurden. Abbildung 23 zeigt die spektralen Eigenschaften eines Normsensors bei der Messung der verwendeten Tungsten- Normlampe (Abbildung 25).

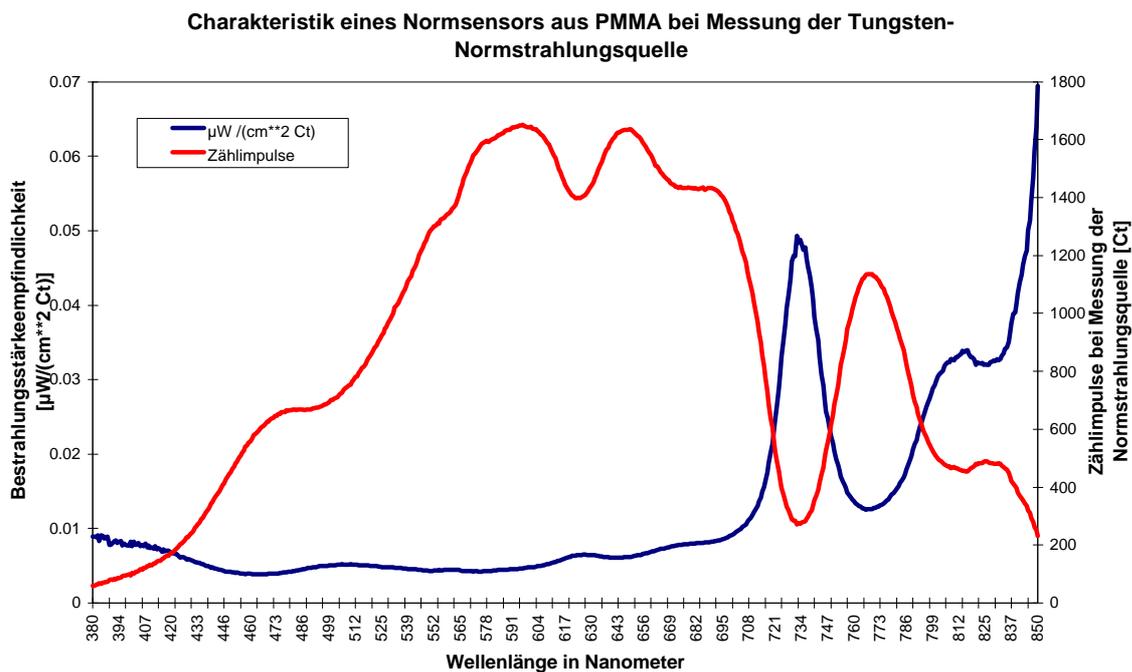


Abbildung 23: Darstellung der spektralen Eigenschaften eines Normsensors bei der Messung der Tungsten- Normlampe (Integrationszeit 1 Sekunde).

Alle verwendeten Normsensoren wurden aus Kunststoff- Lichtwellenleiter (PMMA) hergestellt, da diese relativ einfach selbst konfektioniert werden können. Die Länge wurde auf 2 m festgelegt. Abbildung 23 zeigt, dass bei dieser Länge das lokale Dämpfungsmaximum bei 622 nm sehr wenig zum Tragen kommt, wohingegen bei etwa

730 nm die Absorption im Lichtwellenleiter vergleichsweise groß ausfällt. Dennoch ist die Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit beim Minimum mit ca. $0,05 \mu\text{W cm}^{-2} \text{ Ct}^{-1}$ noch als ausreichend für die Kalibrierung der Glasfaser- LWL anzusehen. Ab 850 nm ist die Dämpfung im PMMA- LWL allerdings so stark, dass mit diesem Normsensormaterial keine Kalibrierung jenseits von 850 nm durchgeführt werden kann.

Bei Wellenlängen unterhalb von 380 nm ist die Kalibrierung nicht durch das Dämpfungsverhalten des Kunststoff- LWL, sondern durch die geringe Strahlungsenergie der Tungsten- Normlampe begrenzt.

Für die Kalibrierung wurden immer zwei Normsensoren verwendet. Der dritte Sensor dient als Ersatz, falls einer der verwendeten Normsensoren ausfallen sollte.

Abbildung 24 zeigt die Skizze des Messaufbaus, durch den die relativen Kalibrierfaktoren bestimmt werden.

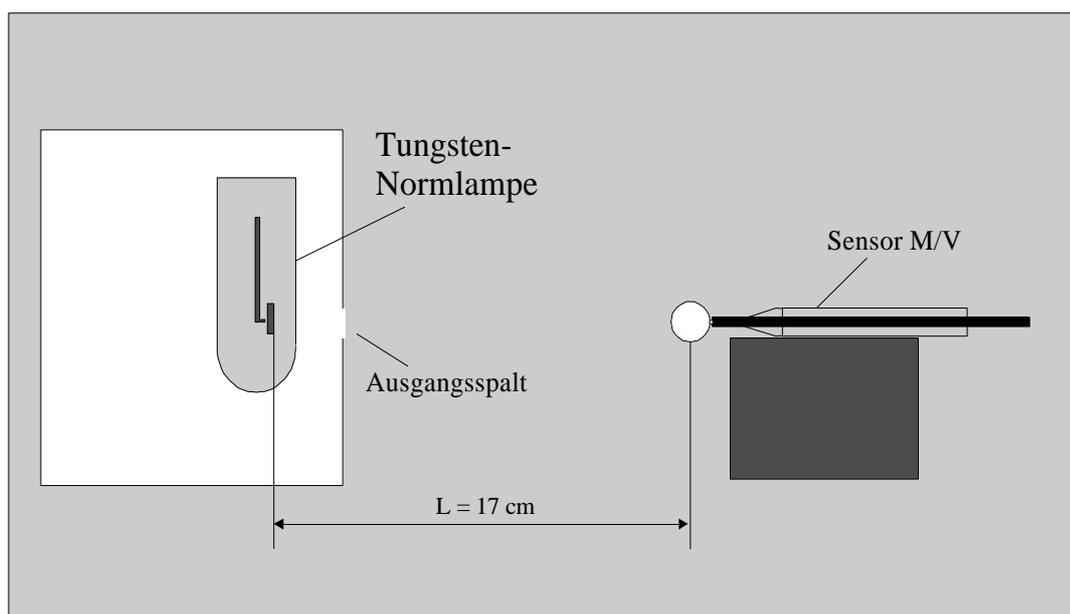


Abbildung 24: Schema der Relativ- und Bestrahlungsstärkekalibrierung eines Messensors mit einem Vergleichssensor.

Das Lichtspektrum einer Normlampe wird dabei einmal durch den Messsensor **M** und anschließend durch die Vergleichssensoren **V** gemessen. Für die Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung der einzelnen Messungen werden diese mindestens zwölfmal wiederholt. Auf die Fehlerabschätzung wird in Kapitel 3.2.4 näher eingegangen.

Die Kalibrierung wurde bei einem Abstand $L = 17$ cm zwischen Sensorkopfmittelpunkt und Normlampenfilament durchgeführt. Aus der raumwinkelbezogenen Bestrahlungsstärke in Abbildung 25 und der Gleichung F - 21 kann daraus die wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärke errechnet werden.

Aus den Spektralwerten werden die wellenlängenspezifischen (Pixelnummer des Diodenarrays) Korrekturfaktoren gemäß der Formel F - 16 für jeden Sensor bestimmt und in einer Kalibrierdatei gespeichert.

$$F_M^V(I) = \frac{S_V(I)}{S_M(I)}, \quad \left[\frac{Ct}{Ct} \right] \quad \text{F - 16}$$

$$S^V(I) = F_M^V(I) * S^M(I), \quad [Ct] \quad \text{F - 17}$$

$F_M^V(I)$ = Kalibrierfaktor

$S_M(I)$ = Kalibriermesswert des Messsensors

$S_V(I)$ = Kalibriermesswert des Vergleichssensors

$S^V(I)$ = berechneter Messwert

$S^M(I)$ = tatsächlicher Messwert des Sensors M

I = Diodennummer des Arrays

Ct = Zählimpulse, Counts

Mit Hilfe dieses Kalibrierfaktors $F_M^V(I)$ kann das eigentliche Messsignal $S^M(I)$ des Sensors **M**, das im Messeinsatz ermittelt wird, auf einen zwischen verschiedenen Sensoren vergleichbaren Wert $S^V(I)$ zurückgerechnet werden (Formel F - 17), das heißt, es wird die Lichtinformation bestimmt, die von dem Referenzsensor **V** gemessen worden wäre.

3.2.3 Bestrahlungsstärkekalibrierung der Messsensoren

Zur Kalibrierung der Bestrahlungsstärke wurde ebenfalls auf ein Relativverfahren zurückgegriffen. Dabei werden die Referenz- beziehungsweise Normsensoren mit Hilfe einer Normstrahlungsquelle der Charakteristik $E_0(I)$ auf ihre Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit hin kalibriert (Abbildung 24). Dadurch erhält man eine Empfindlichkeitskurve $E_V^0(I)$ für jeden Normsensor.

$$E_V^0(I) = \frac{E_0(I)}{S_V(I)}, \quad \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{Ct}} \right] \quad \text{F - 18}$$

$E_V^0(I)$ = Empfindlichkeit des Kalibriersensors

$E_0(I)$ = Bestrahlungsstärkecharakteristik der Normlampe

$S_V(I)$ = Kalibriermesswert des Vergleichssensors

I = Diodennummer des Arrays

Ct = Zählimpulse, Counts

Aus dem Kalibrierfaktor $F_M^V(I)$ in Kapitel 3.2.2 und dem tatsächlichen Messsignal $S^M(I)$ des Messensors M (nach Dunkel- und Offset- Korrektur) erhält man schließlich gemäß der Formel F - 19 die tatsächliche, durch den Messsensor gemessene Bestrahlungsstärke $E^0(I)$.

$$E^0(I) = F_M^V(I) * S^M(I) * E_V^0(I), \quad \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2 \cdot \text{nm}} \right] \quad \text{F - 19}$$

$E^0(I)$ = Bestrahlungsstärke des Messsignals

$E_V^0(I)$ = Empfindlichkeit des Kalibriersensors

$F_M^V(I)$ = Kalibrierfaktor

$S^M(I)$ = tatsächlicher Messwert des Sensors M

I = Diodennummer des Arrays

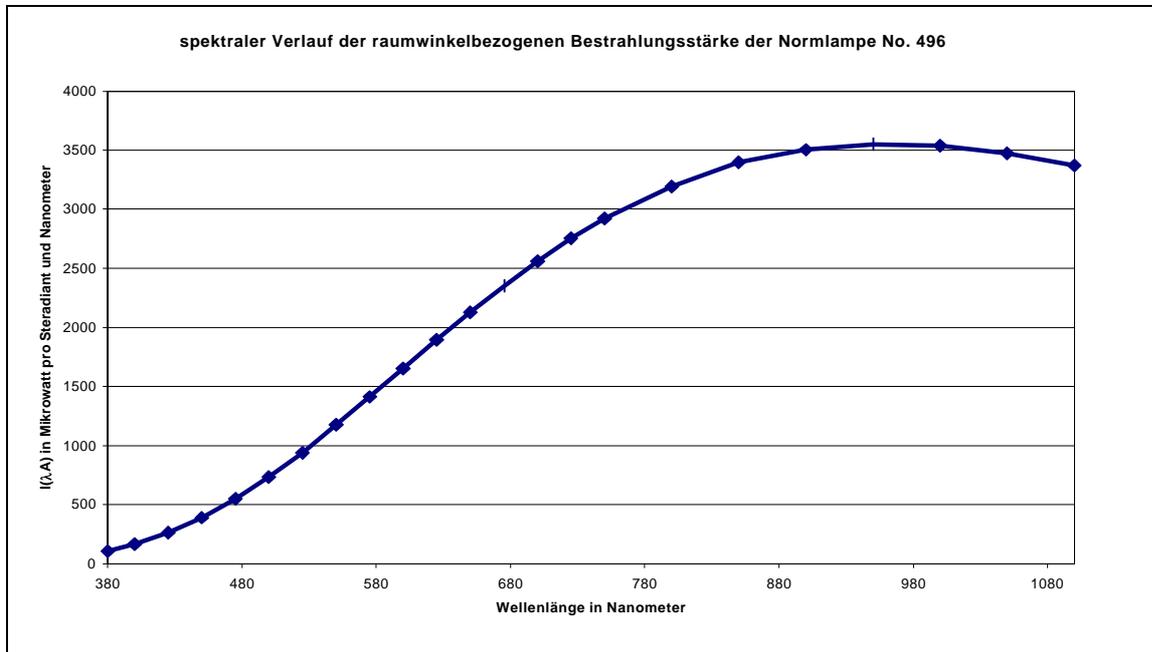


Abbildung 25: Spektraler Verlauf der raumwinkelbezogenen Bestrahlungsstärke I_{1A} der verwendeten Tungsten- Standardlampe No. 496 in $\mu\text{W}/(\text{nm sr})$, aufgetragen nach der Wellenlänge.

Aus der Bestrahlungsstärke des Messsignals der einzelnen Messdioden kann nun der Integrale Wert E unter der Messkurve $E^0(\mathbf{I})$ für die zu betrachtenden Wellenlängenbereiche ermittelt werden. Dazu werden die den Diodennummern zugeordnete Wellenlänge $\lambda(\mathbf{I})$ in Nanometer und die diskreten Trapezflächen unter der Kurve von I_1 bis I_2 für die Berechnung verwendet.

$$E = \sum_{I=I_1}^{I_2-1} \left[\frac{E^0(I+1) + E^0(I)}{2} (I(I+1) - I(I)) \right], \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{F - 20}$$

Für eine möglichst hohe Präzision muss die Charakteristik $E_0(\mathbf{I})$ der Normlampe sehr genau bekannt sein. Der spektrale Verlauf der flächenbezogenen Bestrahlungsstärke $I_{\lambda A}(\mathbf{I})$ der hier verwendeten Tungsten- Standardlampe (No. 496; Stromstärke=15,98A; Intensität=93,3 cd) wurde vom Hersteller angegeben (Abbildung 25). Aus dieser

Angabe kann für jede Entfernung von der Strahlungsquelle die wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärke in Mikrowatt pro Quadratcentimeter und Nanometer errechnet werden (Formel F - 21).

$$E_0(I) = \frac{I_{\lambda A}(I)}{R^2}, \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2 \cdot \text{nm}} \right] \quad \text{F - 21}$$

$E_0(I)$ = Bestrahlungsstärkecharakteristik der Normlampe

$I_{\lambda A}(I)$ = Bestrahlungsstärke im Raumwinkel

R = Entfernung zur Standardlampe

I = Diodennummer des Arrays

3.2.4 Fehlerberechnung bei der Kalibrierung

Bei der Fehlerrechnung wurde von einer Normalverteilung der einzelnen Kalibrier-Messsignale ausgegangen. Die Ergebnisse der Strahlungskalibrierung werden in Kapitel 4 gezeigt. Für die Bestimmung der Faktoren $\mathbf{F}_M^V(\mathbf{I})$ in Gleichung F - 16 und des zufälligen Fehlers wurde das Lichtsignal der Normlampe jeweils mindestens 10 mal von einem Messsensor und von zwei Normsensoren gemessen. Beim Norm- und Messsensor wurde für jede diskrete Wellenlänge (abhängig von der Diodennummer \mathbf{I}) der Mittelwert (F - 22), die Standardabweichung (F - 23) und der Vertrauensbereich des Mittelwertes (F - 24) für das Signal $\mathbf{S}(\mathbf{I})$ berechnet. Der Vertrauensbereich des Mittelwertes bestimmt den Bereich, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (statistische Sicherheit P) liegt (Kuchling, 1989).

$$\overline{S(I)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(I) \quad F - 22$$

$$s(I) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i(I) - \overline{S(I)})^2} \quad F - 23$$

$$\Delta \overline{S(I)} = \frac{t}{\sqrt{n}} s(I) \quad F - 24$$

Tabelle 5: Abhängigkeit des Faktors t von der statistischen Sicherheit P und der Anzahl der Messungen n für die Berechnung des Vertrauensbereiches des Mittelwertes (Kuchling, 1989).

n	3	4	5	6	8	10	20	30
P= 68,3%	1,32	1,20	1,15	1,11	1,08	1,06	1,03	1,02
P= 95%	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1	2,05

Der Faktor t ist dabei von der Anzahl der Messungen n und der gewählten statistischen Sicherheit P abhängig. Tabelle 5 zeigt die Abhängigkeit dieses Faktors von der Anzahl der Messungen bei einer bestimmten statistischen Sicherheit P .

Für die Berechnung der zufälligen Fehler der Kalibrierfaktoren $F_M^V(\mathbf{I})$ und $E_V^0(\mathbf{I})$ wurde von $n = 6$ und $P = 95\%$ ausgegangen und das Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß (F - 25) zur Bestimmung des mittleren Fehlers eines Funktionswertes verwendet.

$$\Delta \bar{F} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta \bar{x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta \bar{y}\right)^2 + \dots} \quad F - 25$$

mit:

$\Delta \bar{F}$	mittlerer Fehler des Funktionswertes
$\Delta \bar{x}$, $\Delta \bar{y}$, usw.	Vertrauensbereich des Mittelwertes der einzelnen Messgrößen
F/x , F/y , usw.	partielle Ableitung der Funktion $F = F(x,y,\dots)$

Wurde an Stelle eines gemittelten Messsignals eine einzelne Spektralmessung verwendet, wie es in den Gleichungen F- 17 und F- 19 der Fall ist, so ist der Fehlerbereich auf das Dreifache der Standardabweichung festgelegt und damit der mittlere Fehler des Funktionswertes bestimmt worden.

Für die in der Auswertung errechneten Integrale beziehungsweise Summen über die Wellenlängen (F - 20) wurde der absolute Fehler bestimmt und jeweils mit abgespeichert.

3.3 Das Messwerverfassungs-, Kalibrier- und Auswertungsprogramm

Da es sich bei dieser Messapparatur um eine Neuentwicklung aus verschiedenen Einzelkomponenten handelt, musste der Messablauf, die Kalibrierung der gesamten Sensorstrecke und die spätere Auswertung der erhobenen Daten eigens auf die speziellen Gegebenheiten und Erfordernisse angepasst werden. Die Softwareentwicklung dieser Messapparatur stellte dabei einen wichtigen und auch zeitintensiven Anteil an der Gesamtarbeit dar. Trotz des großen Aufwandes, eine komplette Ansteuerungs- und Auswertungssoftware zu programmieren, war dies dennoch die preisgünstigste und vor allem flexibelste Lösung für die zu bewältigenden Probleme. Für die Programmierung wurde die graphisch orientierte Programmiersprache Delphi 1.0 der Firma Borland (jetzt Inprise) verwendet.

Die Verwendung einer graphischen Oberfläche hat den großen Vorteil, dass Statuszustände gut verfolgt und Fehleranzeigen schnell erkannt werden können, was bei einer komplexen Ablaufsteuerung mit teilweise parallel ablaufenden Prozessen unverzichtbar ist. Darüber hinaus spielte die einfache Änderung von Parametern während der Laufzeit des Programms bei der Programmentwicklung eine große Rolle, da dadurch Feineinstellungen nicht nur durch die Modifikation des Quell-Codes und der anschließenden Neukompilierung des Programms möglich sind, sondern auch während des Programmlaufes durchgeführt werden können.

In der Messwerverfassung sind verschiedene Teile implementiert. Dazu gehört neben der eigentlichen Messablaufsteuerung auch die Bestimmung von Ausgangsdaten und Faktoren, die für die Messung notwendig sind. Dies sind beispielsweise die Koordinaten der Lichtwellenleiterbefestigungen an der Positionierungsmechanik, die Zuordnung dieser Koordinaten zu den Sensornummern, die Reihenfolge sowie die Häufigkeit, in der die Sensoren gemessen werden. Neben notwendigen Statusanzeigen wurden auch die Messungen für die Kalibrierung in die Messwerverfassungssoftware mit aufgenommen. Im Folgenden werden die wichtigsten Bereiche der Messwerverfassungs- und Auswertungssoftware kurz beschrieben.

3.3.1 Die notwendigen Eingangsdaten für den Messablauf

Für einen reibungslosen Ablauf der Messung müssen Eckdaten zur Verfügung stehen, die sowohl den Messablauf bestimmen als auch eine eindeutige Information über den Messort und den Sensor enthalten. Letzteres ist für die spätere Auswertung von entscheidender Wichtigkeit. Die Eckdaten wurden in vier Tabellen gespeichert. Dabei tragen die Positions-, die Programmablauf- und die Zyklustabelle zur Programmsteuerung während der Messung bei, wohingegen die Messorttabelle bei der späteren Auswertung der Messungen zum Einsatz kommt.

3.3.1.1 Die Positionstabelle

In der Positionstabelle (Tabelle 6) werden die X/Y- Koordinaten der Positionierungsmechanik, an denen die einzelnen LWL befestigt sind, mit einer Positionsnummer verknüpft, das heißt, jeder potentielle Befestigungspunkt eines LWL erhält eine eindeutige Positionsnummer, deren Koordinaten bestimmt werden müssen. Dadurch kann das MCS- Modul nur durch Angabe der Positionsnummer exakt justiert werden.

Tabelle 6: Beispiel für den Aufbau der Positionstabelle für die Zuordnung der X/Y-Koordinaten zu eindeutigen Positionsnummern.

Positionstabelle		
Pos-Nr.	X-Koor.	Y- Koor.
1	1,450	2,456
2	2,953	2,457
3	3,449	2,458
4	18,345	5,678
5	18,333	5,677
6	18,344	5,711
...

Die Grobjustierung der Koordinaten wird dabei durch eine theoretische Berechnung der X/Y- Positionen erreicht. Nach der Montage der Lichtwellenleiterenden in der Haltevorrichtung wird dann eine Feinjustierung durchgeführt. Dabei wird ein Lichtsignal durch den LWL geschickt und die Koordinaten des maximalen Messsignals

werden automatisch gesucht. Die dadurch aktualisierten Daten werden dann mit der Positionsnummer in der Positionstabelle abgespeichert. Diese Justierung kann auch nach der Feldmontage der Sensoren überprüft und nachjustiert werden, was allerdings möglichst stationäre Licht- bzw. Wetterbedingungen voraussetzt.

3.3.1.2 Die Programmablauf- und die Zyklustabelle

Der Programmablauf der Messapparatur wird durch die Programm- und die Zyklustabelle gesteuert. Durch diese beiden Tabellen wird größtmögliche Flexibilität erzielt, da jede Abfahrcharakteristik zu verwirklichen ist. In Tabelle 7 ist je ein Beispiel für eine Programm- und eine Zyklustabelle angegeben, wobei für die Programmierung nur die weiß unterlegten Felder zu modifizieren sind.

In der Programmtabelle wird eine Verknüpfung zwischen der X/Y- Position des an der Mechanik fixierten Sensors mit seiner Sensornummer (Sennr.) hergestellt. Die Positionsnummer (Posnr.) ergibt sich dabei aus der Positionstabelle. Jedem Sensor wird darüber hinaus noch eine Gruppennummer (Grpnr.) zugeordnet, die einzelne Sensoren zu einer Gruppe zusammenfasst. Die Sensoren einer Gruppe werden schrittweise mit der kleinsten zeitlichen Differenz gemessen. Der Gruppenindex (Grpix.) in der Programmtabelle gibt schließlich die Reihenfolge an, in der die Sensoren einer Gruppe angefahren werden sollen. Wird als Gruppenindex eine Null angegeben, so wird der zu der Gruppe gehörende Sensor nicht angefahren. Für die benutzerfreundliche Eingabe des Programmablaufes wurden Test- und Sortier Routinen entwickelt, durch die Änderungen an der Programmtabelle möglichst einfach durchgeführt werden können.

Tabelle 7: Beispiel für eine bereits geordnete Programm- und Zyklustabelle. Mit diesen Tabellen wird der Messablauf programmiert.

Programmtabelle					Zyklustabelle				
Prgrnr	Posnr	Sennr	Grpnr	Grpix	Zyknr	Grpnr	RepCt	Grpst	Grpsp
1	3	403	40	1	1	40	1	1	3
2	2	402	40	2	2	41	1	5	7
3	1	401	40	3	3	42	2	8	9
4	4	411	41	0	4	0	0	0	0
5	5	412	41	1	5	0	0	0	0
6	6	413	41	2	6	0	0	0	0
7	7	415	41	3	7	0	0	0	0
8	8	421	42	1	8	0	0	0	0
9	9	422	42	2	9	0	0	0	0

Die Sortierung in der Programmtabelle bezieht sich auf die Gruppennummer und auf den Gruppenindex. Gemäß dieser Kriterien werden die Paare aus Positions- und Sensornummer in eindeutiger Weise einer Programmnummer zugeordnet, die aufsteigend die Anfahrcharakteristik wiedergibt.

Die eigentliche Messablaufsteuerung wird mit der Zyklustabelle realisiert. Die Gruppen, deren Sensoren gemessen werden sollen, werden in die Zyklustabelle eingetragen und das Programm errechnet gemäß der Programmtabelle die Gruppenstart- (Grpst) und die Gruppenstopp- (Grpsp.) Programmnummer. Schließlich kann hier auch die Wiederholrate (RepCt.) festgelegt werden, mit der die zugeordnete Gruppe gemessen werden soll. In den Beispieltabellen (Tabelle 7) werden die Sensoren der Gruppen 40 und 41 je einmal gemessen und die Gruppe 42 zweimal hintereinander abgefahren, bis die Messung mit der Gruppe 40 wieder von vorne beginnt.

3.3.1.3 Die Messorttabelle

Die Messorttabelle ist für die spätere Auswertung von entscheidender Wichtigkeit, da durch sie die X/Y/Z- Koordinaten der Sensoren, die im Waldbestand verteilt wurden, mit der Sensornummer verknüpft sind.

Tabelle 8: Beispiel für eine Messorttabelle, in der die Koordinaten der im Bestand verteilten Sensoren mit der Sensornummer verknüpft sind.

Messorttabelle				
Messnr.	Sennr	X[m]	Y[m]	Z[m]
1	401	5,46	10,34	2,10
2	402	5,46	10,34	6,56
3	403	5,46	10,34	11,45
...

3.3.2 Der Messablauf und die Struktur der Daten

3.3.2.1 Beschreibung der Messprogrammoberfläche und des Messablaufs

In Abbildung 26 wird der Teil des Programms dargestellt, der beim Messablauf angezeigt wird. Neben der Anzeige verschiedenster Statussignale wie die derzeitige Position der X/Y- Mechanik oder der Zustand der geladenen Module für die Ansteuerung und Messung werden auch Informationen darüber gegeben, in welchem Messzyklus und bei welchem Sensor sich die Apparatur befindet. Schließlich werden auch die Programmier- und die Zyklustabelle angezeigt, die für die Abfolge der Messung verantwortlich sind. Im linken Teil der graphischen Oberfläche ist bei der Messung das jeweils aktuelle Spektrum mit Zusatzinformationen sichtbar.

Nach der Betätigung des Start- Knopfes werden zuerst die Servomotoren initialisiert und anschließend die Steuerungstabellen, die am rechten unteren Rand der Messoberfläche angegeben sind, geladen. Nach der Überprüfung und Berechnung der Werte in der Programm- beziehungsweise Zyklustabelle wird getestet, ob eine Abbruch- oder Wartebedingung erfüllt ist. Wurden die Servomotoren nicht richtig initialisiert oder wurden die Endschalterpositionen der Mechanik erreicht, so führt dies zum Abbruch des Messprogramms. Eine Wartebedingung ist erfüllt, wenn die Startzeit nicht innerhalb des Messintervalls (zum Beispiel 4:00 bis 21:00 MEZ) liegt oder die Mechanik noch nicht den Zielpunkt erreicht hat.

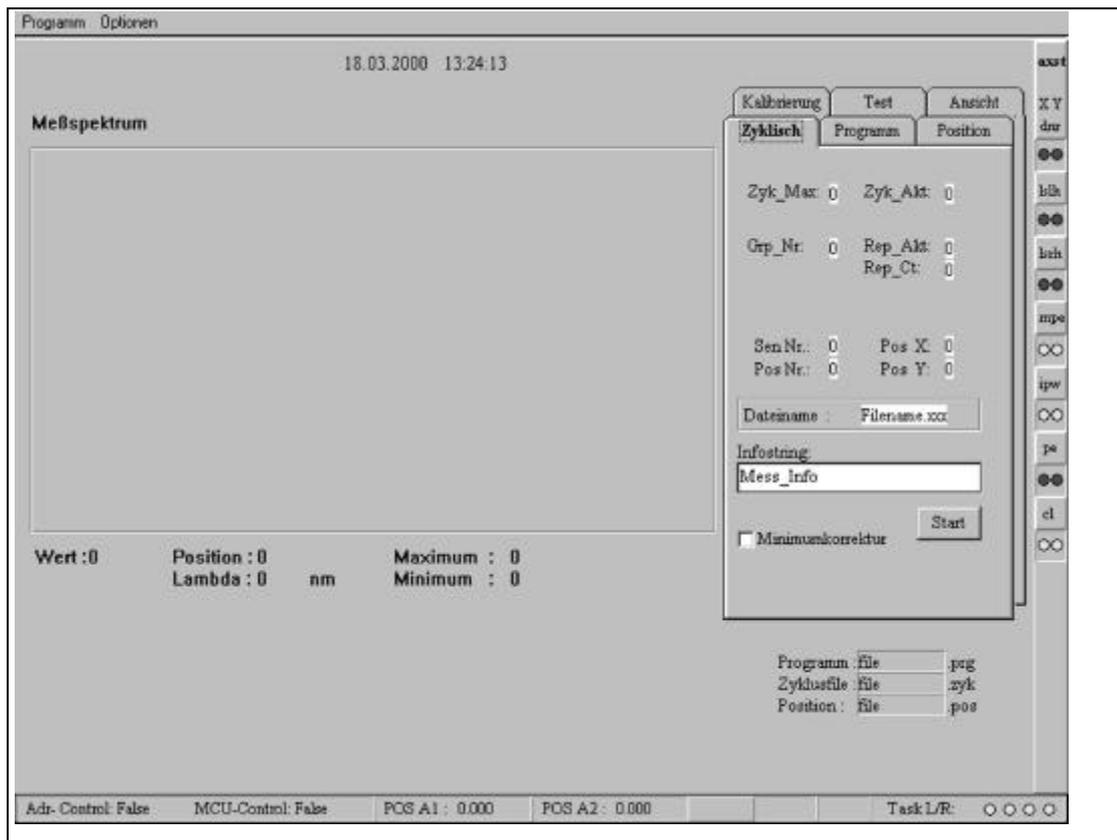


Abbildung 26: Graphische Messoberfläche mit Erläuterungen.

Sind weder Warte- noch Abbruchbedingungen erfüllt, wird aus dem aktuellen Datum und der Uhrzeit das Speicherverzeichnis und der Dateiname für die Messspektren angelegt. Schließlich wird nach den Vorgaben in der Programm- und Zyklustabelle das Verfahrenschema festgelegt, die Sensoren werden sequenziell abgefahren und das Lichtspektrum wird mit einer vorgegebenen Integrationszeit gemessen. Sollte während einer Messung das MCS- Modul übersteuert werden, also die Lichtintensität so groß sein, dass die Dioden in einen Sättigungsbereich gelangen, wird die Integrationszeit automatisch so lange reduziert, bis eine einwandfreie Messung vorliegt. Neben der Messung des Lichtspektrums mit der Integrationszeit wird darüber hinaus eine zweite Messung mit einer vorher definierten Referenzzeit durchgeführt. Durch beide Messungen können die spektralen Informationen bei verschiedenen Integrationszeiten durch Extrapolation verglichen und zum Beispiel auf einen Standardwert hin umgerechnet werden.

Wurden alle Sensorgruppen der Zyklustabelle und die eventuell vorhandenen Wiederholungen bis zum Ende abgearbeitet, startet die Messung wieder mit der

Zyklusnummer 1 von neuem. Während des gesamten Messvorgangs werden ständig die Abbruch- beziehungsweise Wartebedingungen geprüft und die notwendigen Schritte eingeleitet.

3.3.2.2 Datenstruktur, Dateinamenskonvention und Verzeichnisstruktur

Die gemessenen Spektren werden mit einer Reihe von Zusatzinformationen gespeichert, damit immer eine eindeutige Zuordnung zwischen Lichtinformation, Messzeit und Messort besteht (Tabelle 9). Der erforderliche Speicherbedarf für ein Spektrum beläuft sich dadurch auf etwa 9 kB.

Tabelle 9: Datenstruktur eines Messspektrums mit den abgespeicherten Zusatzinformationen.

Name	Wertebereich	Beschreibung
Sp_DateTime	Fließkommazahl	Messzeit des Spektrums
Sp_Info_Str	Zeichenkette	zusätzl. Information (frei)
Sp_Spk_typ	Ganzzahl	Angabe zum Sensortyp
Sp_Sen_Nr	Ganzzahl	Nummer des Sensors
Sp_Pos_Nr	Ganzzahl	Nummer der Position
Sp_Measure_OK	Bool'scher Ausdruck	Markierung für die Auswertung
Sp_Integ_Time	Ganzzahl	Integrationszeit der Messung
Sp_Ref_Time	Ganzzahl	Integrationszeit der Referenz
Sp_Val	Array aus Ganzzahlen	spektrale Messinformation
Sp_Ref	Array aus Ganzzahlen	Messinformation der Referenz

Während der Messung werden die Spektralinformationen in einer speziellen Verzeichnisstruktur und mit einem festgelegten Dateinamen gespeichert. Verzeichnis- und Dateinamen beziehen sich dabei auf das Datum und die Messzeit (Tabelle 10).

Tabelle 10: Aufbau der Verzeichnis- und Dateinamen aus dem Messdatum und der Messzeit.

Verzeichnisname	JJMMDDHH
	JJ - Jahr (99 - 1999; 00 - 2000)
	MM - Monat (01 bis 12)
	DD - Tag (01 bis 31)
	HH - Stunde (00 bis 23)
Filename	JMDHNNSS.mcs
	J - Jahr (A - 1999; B - 2000; C - 2001;...)
	M - Monat (1 bis 9, 10 - A, 11 - B, 12 - C)
	D - Tag (1 bis 9, 10 - A, 11 - B, ..., 31 - V)
	H - Stunde (1 bis 9, 10 - A, 11 - B, ..., 23 - N)
	NN - Minute (00 bis 59)
	SS - Sekunde (00 bis 59)

Dem Dateinamen wird noch die Endung „mcs“ angefügt, um die Datei als Spektrumsdatei zu kennzeichnen.

3.3.3 Weitere Softwaremodule

3.3.3.1 Bestimmung der Kalibrierfaktoren

Der Aufbau und die Konzeption der Kalibrierung wurden bereits in Kapitel 3 erläutert. Hier sollen nun Programmaufbau und Programmablauf näher beschrieben werden.

3.3.3.1.1 Sensormessungen für die Kalibrierung

Vor der Kalibrierung müssen die Sensoren mittels der Haltevorrichtung an der Positionierungsmechanik montiert und die Position muss mit Hilfe des Positionieralgorithmus eingerichtet sein. Außerdem muss die Normstrahlungsquelle mindestens eine halbe Stunde vor Kalibrierbeginn auf die notwendige Stromstärke eingestellt werden, um die notwendige Strahlungskonstanz zu gewährleisten. Das MCS-Modul wird nun durch das Messprogramm erst unter dem zu kalibrierenden

Lichtwellenleiter und dann je unter zwei Vergleichssensoren justiert und das Spektrum mehrfach gemessen.

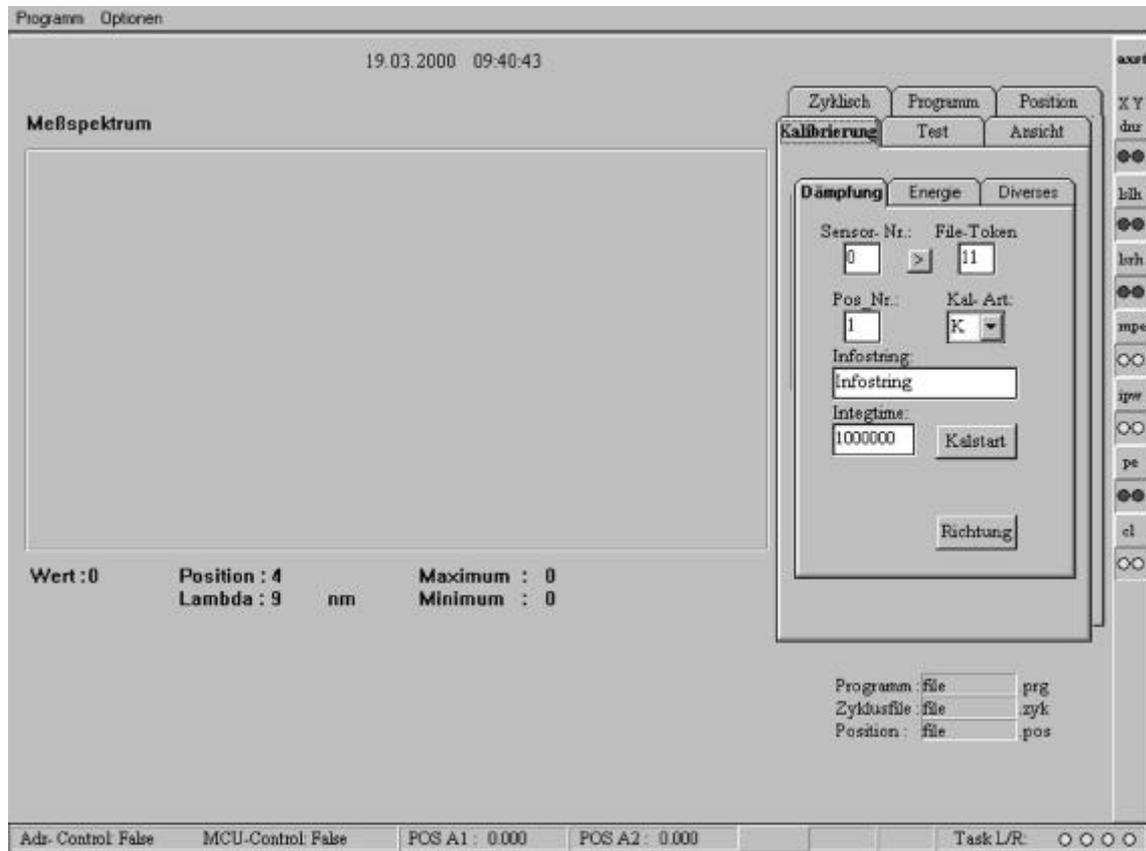


Abbildung 27: Messprogrammansicht für die Messung der Sensoren bei der Kalibrierung.

In Abbildung 27 ist die graphische Oberfläche der Dämpfungskalibrierung gezeigt. Damit bei der Messung der Kalibrier- und Vergleichssensoren später eine eindeutige Zuordnung hergestellt werden kann, besteht der jeweilige Dateiname aus der Kombination von File- Token (gemeinsamer Teil) und der Kalibriersensorart (Kal-Art, K- Messsensor, R- Vergleichssensor). Das File- Token entspricht dabei der Sensornummer des zu kalibrierenden Sensors. In Tabelle 11 ist ein Beispiel für die Dateinamenskönvention angegeben.

Tabelle 11: Beispiel für die Dateinamenskonvention bei der Kalibrierung eines Sensors mit Vergleichssensoren.

Sensornummer	401
Datei- Token	401
Dateiendung mit Zählvariabler	.xxx
Dateiname für Messsensor	401K.xxx
Dateiname für Vergleichssensoren	401R.xxx

Bei Wiederholungsmessungen wird eine Zählvariable automatisch um einen Wert erhöht, damit keine vorherige Kalibrierungsdatei überschrieben werden kann.

3.3.3.1.2 Berechnung der Kalibrierfaktoren

Aus den Messungen in Kapitel 3.3.3.1.1 werden in einem zusätzlichen Programm (Abbildung 28) die Kalibrierfaktoren, also der Quotient aus Kalibriersensorsignal und Messensorsignal, für jedes Pixel des Diodenarrays errechnet und in spezielle Kalibrierdateien gespeichert. Dabei werden alle Einzelmessungen jeweils gemittelt und zusätzlich wird für eine Fehlerabschätzung die Standardabweichung errechnet. Alle Faktoren und ermittelten Informationen werden dabei sowohl in ein binäres Dateiformat als auch in ein Textformat übertragen und gespeichert. Die einzelnen Berechnungen können dabei sowohl für jeden Sensor einzeln als auch für alle bis dahin kalibrierten Sensoren automatisch durchgeführt werden.

Ein wichtiger Korrekturfaktor, der bei einer zeitlich hoch aufgelösten Messung zu berücksichtigen ist, ist die nicht exakt laufende PC- Uhr. Innerhalb einer Woche können dabei Zeitdifferenzen von mehreren Minuten zur exakten Zeit auftreten. Durch das Kalibrierprogramm können die aufgetretenen Zeitdifferenzen in ein Textfile eingegeben werden und anschließend in ein für das Auswertungsprogramm lesbares binäres Format umgewandelt werden. Auch die Energieempfindlichkeit des MCS- Moduls bei der Messung mit den Referenzsensoren wird hier für die spätere Integration ermittelt.

Schließlich werden die Gewichtungsfaktoren für die Charakteristik des menschlichen Auges für den sichtbaren Spektralbereich errechnet und ebenfalls binär gepackt. Im Auswertungsprogramm wird daraus die photometrische Größe der Beleuchtungsdichte in Lux (Lumen pro Quadratmeter) errechnet.

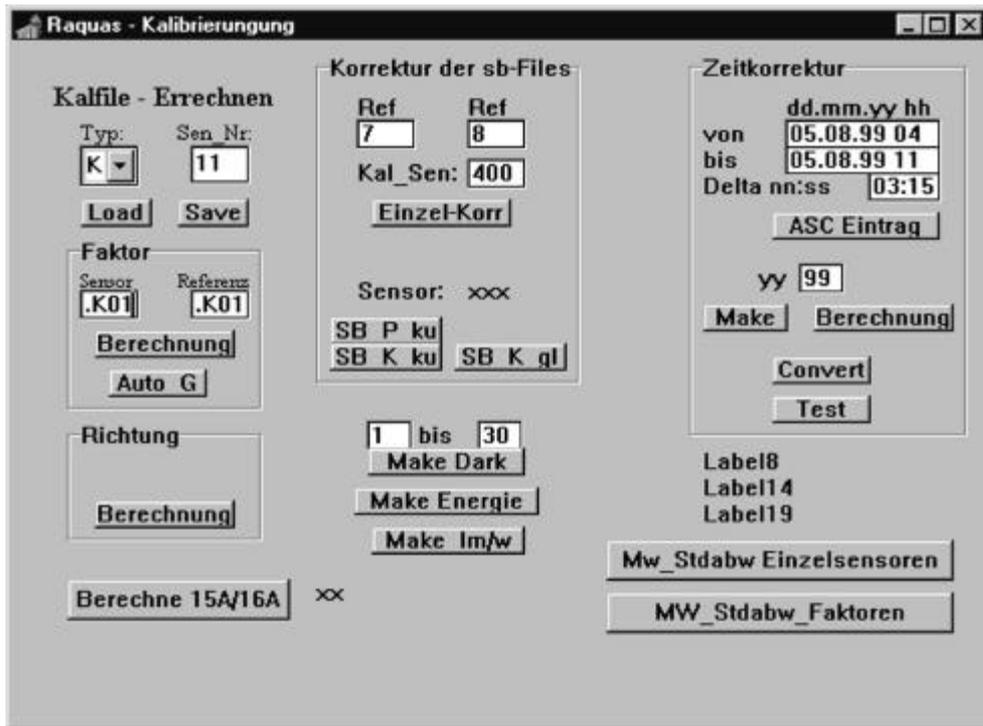


Abbildung 28: Kalibrierprogramm zur Errechnung der Kalibrierfaktoren und deren Standardabweichung sowie weiterer Korrekturdateien für die spätere Auswertung.

3.3.3.2 Auswertung der Messdaten

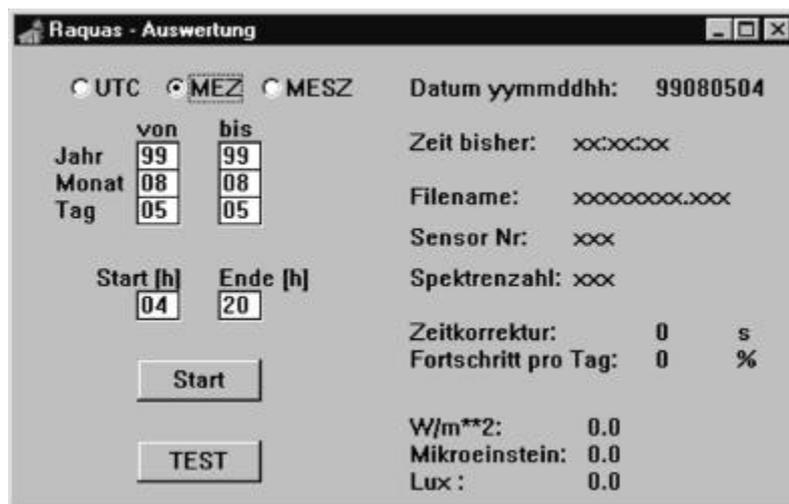


Abbildung 29: Auswertungsprogramm zur Berechnung der Integralwerte sowohl in Watt pro Quadratmeter als auch in Mikroeinsteinstein und Lux pro Quadratmeter.

In einem weiteren Programm, dem Auswertungsprogramm (Abbildung 29), erfolgt die Berechnung der Integralwerte der spektralen Information. Der Berechnungszeitraum kann dabei frei gewählt werden. Als Ergebnis errechnet das Programm standardmäßig für jeden gemessenen Sensor den Integralwert für die Bestrahlungsstärke, die Photonenzahl pro Quadratmeter und Sekunde (Mikroeinsteinstunde) und die photometrische Größe der Beleuchtungsstärke sowohl für den entsprechenden Gesamtspektralbereich als auch in den Teilbereichen mit 10 nm Breite. Dabei greift das Programm auf die vorher ermittelten Kalibrierfaktoren zurück.

3.4 Einsatz der Messapparatur im Kranzberger Forst bei Freising

3.4.1 Beschreibung des Messstandortes

Die Messungen wurden an einem Standort im Kranzberger Forst ungefähr 5 km westlich von Freising durchgeführt (Abbildung 30), wobei sich die Versuchsfläche bei etwa 48,4° nördlicher Breite, 11,7° östlicher Länge und auf einer Höhe von 490 m über NN befindet. Dieser Fichten- Buchen- Mischbestand ist als Parzelle 1 (Gesamtfläche 5000 m²) in der Wuchsreihe Freising FRE 813 erfasst (*Kahn und Schütze, 1997*) und waldwachstumskundlich gut charakterisiert (*Pretzsch et al., 1998*). Der heutige Fichtenbestand ist mit Stichtag vom 1. Januar 2000 49 Jahre alt, die beiden Buchengruppen sind zwischen 7 und 15 Jahre älter. Die Bäume weisen eine mittlere Höhe von 25 m über Boden auf und die Hangneigung nach Norden beträgt etwa 1,8°.

Die Infrastruktur dieses Standortes ist sehr gut ausgebaut, da dort der Sonderforschungsbereich „Wachstum oder Parasitenabwehr“ SFB 607 angesiedelt ist. Neben den drei vorhandenen, etwa 30 m hohen Türmen, die in den Höhen von 17, 19, 21 und 23 m mit Stegen verbunden sind, wurde ein weiterer Turm am nordöstlichen Ende der Fläche montiert. In Abbildung 31 wird der Blick unterhalb der Buchengruppe in den noch nicht belaubten Kronenraum gezeigt.

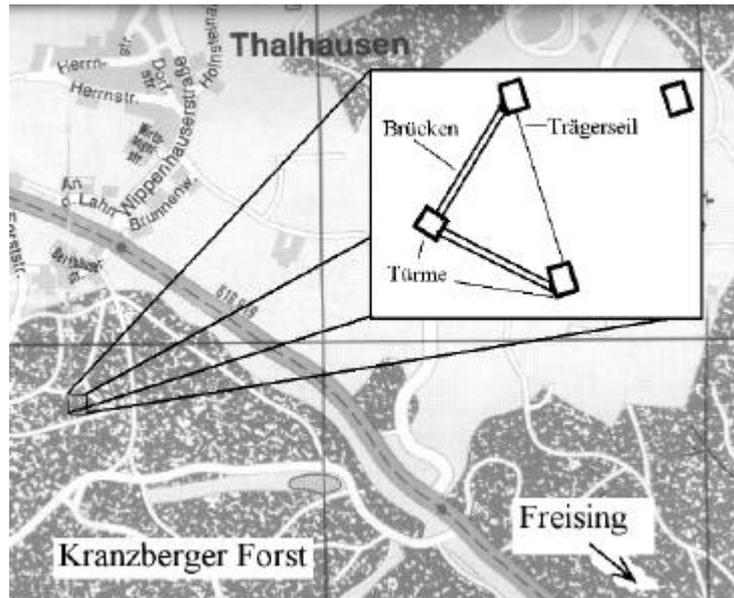


Abbildung 30: Lagebeschreibung der Parzelle 1 der Wuchsreihe Freising FRE 813 (Kahn und Schütze, 1997); die Anordnung der Türme ist nicht maßstäblich.

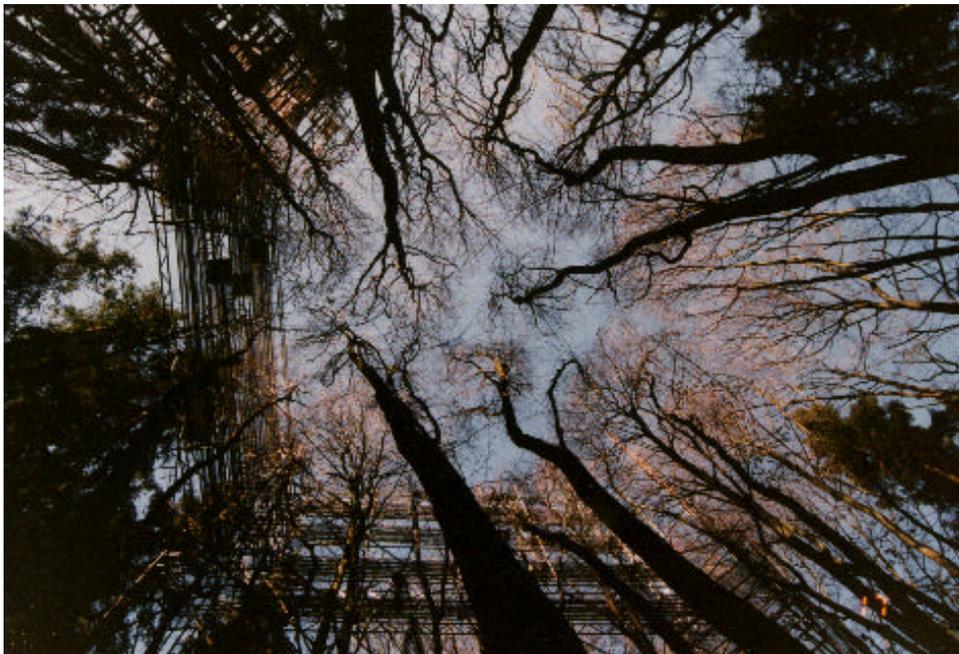


Abbildung 31: Foto der Versuchsfläche unterhalb der noch nicht belaubten Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche (Foto: Reitmayer Heinrich).

Die eigentliche Versuchsfläche stellt einen Teil der Parzelle 1 dar und umfasst eine Fläche von 40 x 30 m². Abbildung 32 zeigt die Versuchsfläche mit den in ihr verteilten Bäumen mit Baumart sowie die Lage der Türme und die des Messwagens.

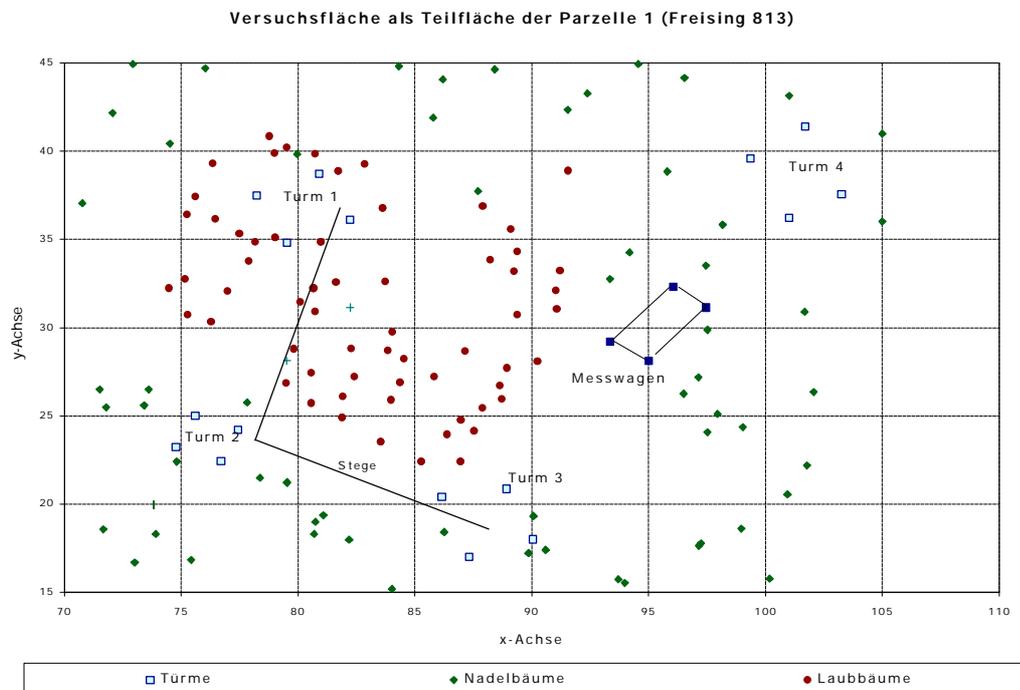


Abbildung 32: Die Versuchsfläche als Teil von Parzelle 1 der Wuchsreihe Freising FRE 813. Der Koordinatenursprung liegt am südwestlichen Teil der Parzelle und bildet eine Grundlage bei der waldwachstumskundlichen Erhebung des Standortes (die Daten der Versuchsfläche wurden von der Waldwachstumskunde der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt).

3.4.2 Der Messaufbau und begleitende Messungen

Die Messapparatur musste in einem eigens dafür vorgesehenen, abgedunkelten Raum montiert werden, da zwischen den Lichtwellenleitenden und dem Spektrometer ein kleiner Spalt bleibt, aber Fremdlichteinwirkung ausgeschlossen werden muss. Die Positionierungsmechanik, das MCS- Modul, die Ansteuerungselektronik und die Programmsteuerung wurden in einen Messwagen eingebaut, der an eine zentrale Stelle im Bestand gestellt wurde (Abbildung 32 und Abbildung 33). Die Fenster des

Messwagens und die X-Y- Mechanik im Inneren wurden durch Verdunkelungsfolie abgedeckt.



Abbildung 33: Position des Messwagens innerhalb eines Fichten- Buchen- Mischbestandes; die gesamte Messapparatur ist in diesen verdunkelten Messanhänger eingebaut (Foto: Reitmayer Karin).

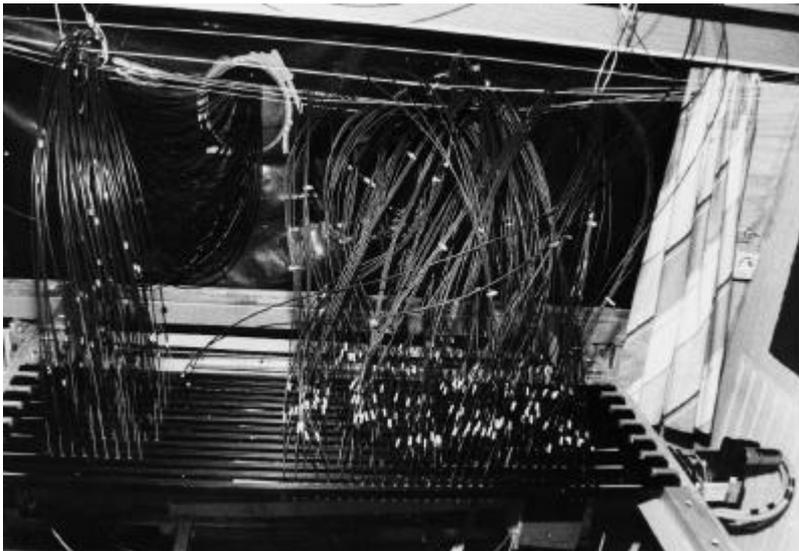


Abbildung 34: Lichtwellenleiter- Befestigung an der Haltevorrichtung innerhalb des Messwagens (Foto: Reitmayer Karin).

Der verwendete Messwagen wurde Ende 1998 von einem anderen Projekt des Lehrstuhls für Bioklimatologie und Immissionsforschung zur Verfügung gestellt und der Innenausbau entsprechend der neuen Fragestellung komplett verändert.

Zu Beginn des Projektes war geplant, Lichtsensoren an den Eckpunkten eines regelmäßigen Raumgitters zu platzieren. Wegen der heterogenen Struktur des Bestandes und dem Fehlen von Befestigungsmöglichkeiten entschied man sich, eine an den Waldbestand angepasste Sensorverteilung zu realisieren. Die Lichtwellenleiter werden dabei in und über der Krone der zu messenden Bäume sowohl an den Türmen, Stegen, Drahtseilen und an zwei Meter langen Stangen über dem Boden befestigt. Abbildung 35 zeigt ein Beispiel für eine Lichtwellenleiter- Befestigung an einem Edelstahlseil innerhalb eines Bestandes.



Abbildung 35: Beispiel für eine Befestigung des Lichtwellenleiters an einem Edelstahlseil im Bestand (Foto: Reitmayer Karin).

Insgesamt 60 Glasfaser- LWL wurden im Bestand verteilt. An den Türmen 1 beziehungsweise 4 wurde je ein und an Turm 3 wurden 2 Vertikalprofile mit je fünf Sensoren installiert. Der höchste Sensor ragte über den Bestand, die anderen waren innerhalb des Kronenbereiches beziehungsweise unterhalb der Baumkronen befestigt. Zwischen den Türmen 1 und 3 wie auch zwischen 1 und 4 wurden Drahtseile gespannt, an denen ebenfalls bis zu vier Sensoren Platz fanden. Die restlichen Sensoren konnten an den Verbindungsstegen im Kronenraum und am Boden in zwei Meter Höhe über Grund an Stangen montiert werden. Die Verwendung der Kunststoff- LWL wurde erst im Frühjahr 2000 eingeleitet, da mit ihnen innerhalb des Sonderforschungsbereiches

speziell eine integrale Information der PAR und deren kleinräumige Variation an einzelnen Zweigen über eine Vegetationsperiode untersucht werden soll. Das Schema der räumlichen Verteilung der Glasfaser- Sensoren ist in Abbildung 36 gezeigt.

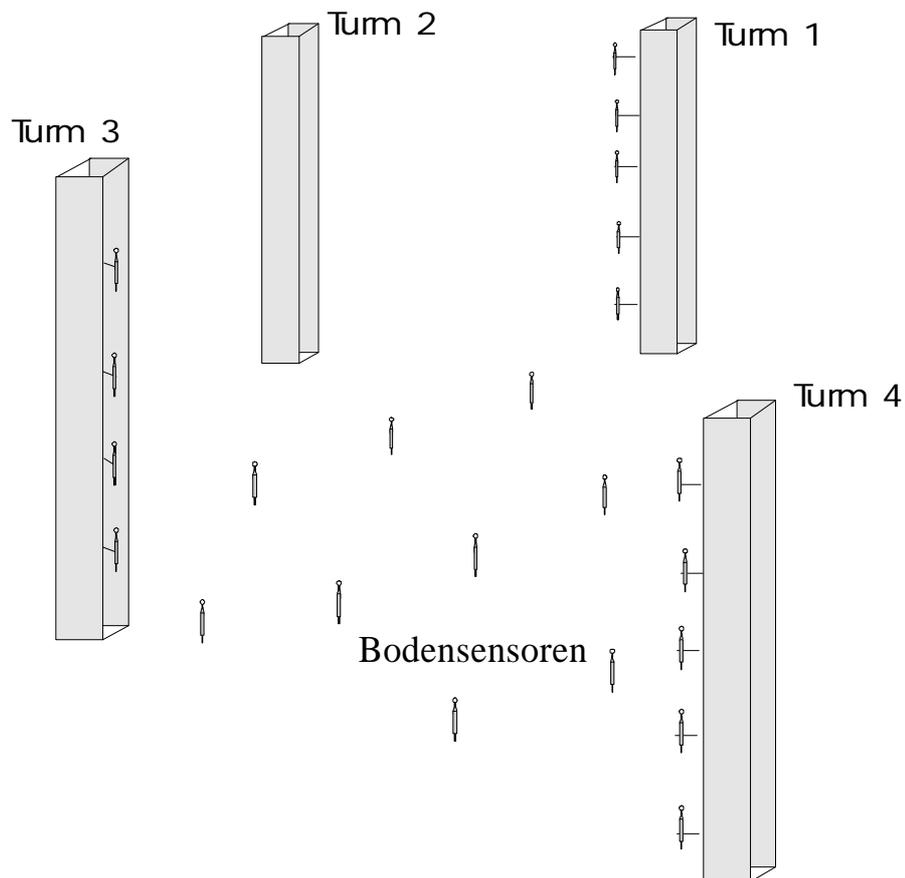


Abbildung 36: Schemazeichnung der räumlichen Verteilung der Glasfaser- Sensoren innerhalb der Versuchsfläche. Die Bodensensoren sind in einer Höhe von 2 m über dem Boden befestigt. Höhenprofile sind an den Türmen 1,3 und 4 angebracht.

Am Referenzturm (Turm 4) der Versuchsfläche wurden zur Messung des Strahlungsinputs in 30 m Höhe zwei Globalstrahlungsmesser CM 11 der Firma Kipp & Zonen montiert, wobei einer durch einen Abschattungsring nur den diffusen Strahlungsanteil registriert. Die Daten wurden als Zehn-Sekunden-Mittelwerte auf einem Rechner gespeichert.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Messgenauigkeit und Vergleichbarkeit der Messsensoren

Als Ergebnis der Kalibrierung lässt sich Folgendes zusammenfassen:

- Auf Grund der Dämpfungseigenschaften haben die PMMA- Sensoren eine etwa sechsmal schlechtere Bestrahlungsstärkecharakteristik als Glasfasersensoren (Abbildung 37).
- Der relative Fehler der Kalibrierung, woraus sich die Vergleichbarkeit der Sensoren ableitet, liegt bei etwa 5%.
- Der Fehler bei der Absolutkalibrierung der Bestrahlungsstärke liegt je nach Wellenlänge zwischen 6 und 10%.
- Das untere Detektionslimit ist wellenlängenabhängig und liegt im PAR-Wellenlängenbereich für PMMA- Sensoren bei circa $0,9 \text{ W/m}^2$ und für Glasfasersensoren bei etwa $0,2 \text{ W/m}^2$.

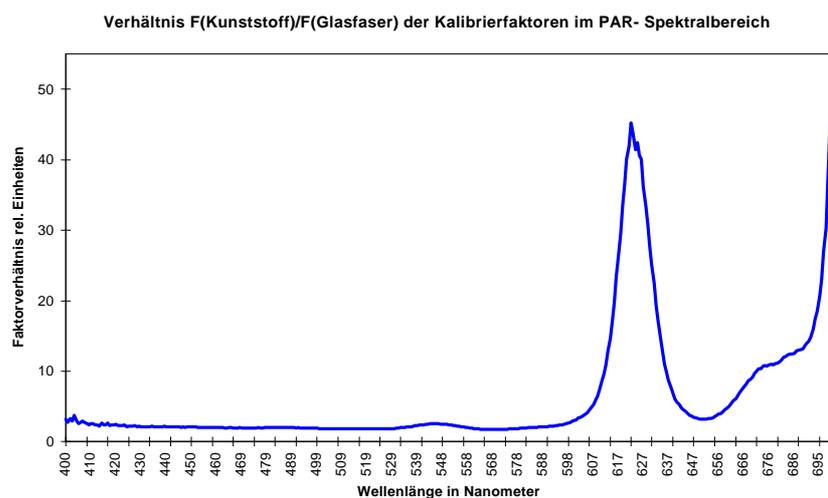


Abbildung 37: Darstellung des wellenlängenabhängigen Verhältnisses zwischen den Kalibrierfaktoren eines Kunststoff- und eines Glasfaser- Lichtwellenleiters im PAR-Spektralbereich..

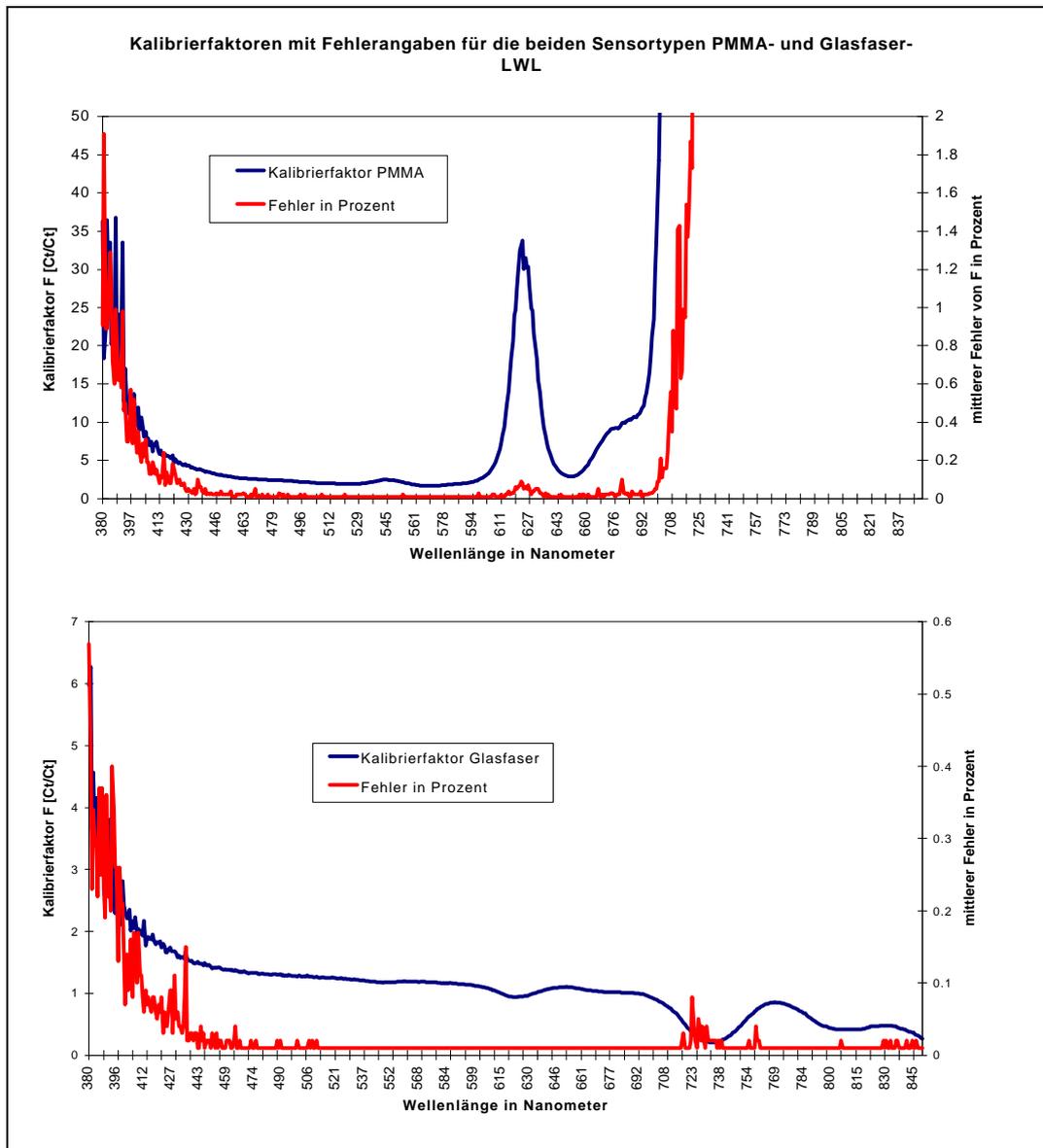


Abbildung 38: Kalibrierfaktoren mit Fehlerangaben (zufälliger Fehler) bei den zwei verwendeten Sensortypen; PMMA- Sensor mit 37 m Länge und Glasfaser- LWL mit 30 m Länge.

Abbildung 38 zeigt jeweils ein Beispiel für Kalibrierfaktoren eines PMMA- Sensors und eines Glasfasersensors. Dieser Faktor gibt dabei an, um wievielfach besser der Normsensor das Licht bei einer bestimmten Wellenlänge leitet als der Messsensor. Unterhalb von 400 nm ist der größere Fehler und der Anstieg im Kalibrierfaktor auf ein relativ kleines Intensitätssignal der Normlampe zurückzuführen, wogegen im oberen Spektralbereich Dämpfungscharakteristiken der Lichtwellenleiter hervortreten. Es wird

deutlich, dass der Glasfasersensor im gesamten Spektralbereich (380 nm bis 850 nm) sehr gute Transmissionseigenschaften aufweist. Der kleine Fehleranstieg bei etwa 730 nm ist auf die Eigenschaften des Normsensors zurückzuführen, der hier eine größere Dämpfung aufweist. Der PMMA- Sensor kann oberhalb von circa 700 nm keine verlässlichen Messsignale mehr liefern, da hier bei einem 37 m langen Kunststofflichtleiter die Dämpfung zu groß wird.

Das lokale Dämpfungsmaximum des PMMA- Materials bei 622 nm führt zu einem Anstieg im Kalibrierfaktor. Dies zeigt sich auch durch die Erhöhung des relativen Fehlers an diesem Punkt, der die maximale Länge des LWL reduziert und die Nachweisgrenze der gemessenen Strahlung in diesem Wellenlängenbereich anhebt.

Die wellenlängenabhängige Nachweisgrenze der Bestrahlungsstärke ist in Abbildung 39 für jeweils einen Kunststoff- und einen Glasfaserlichtwellenleiter dargestellt.

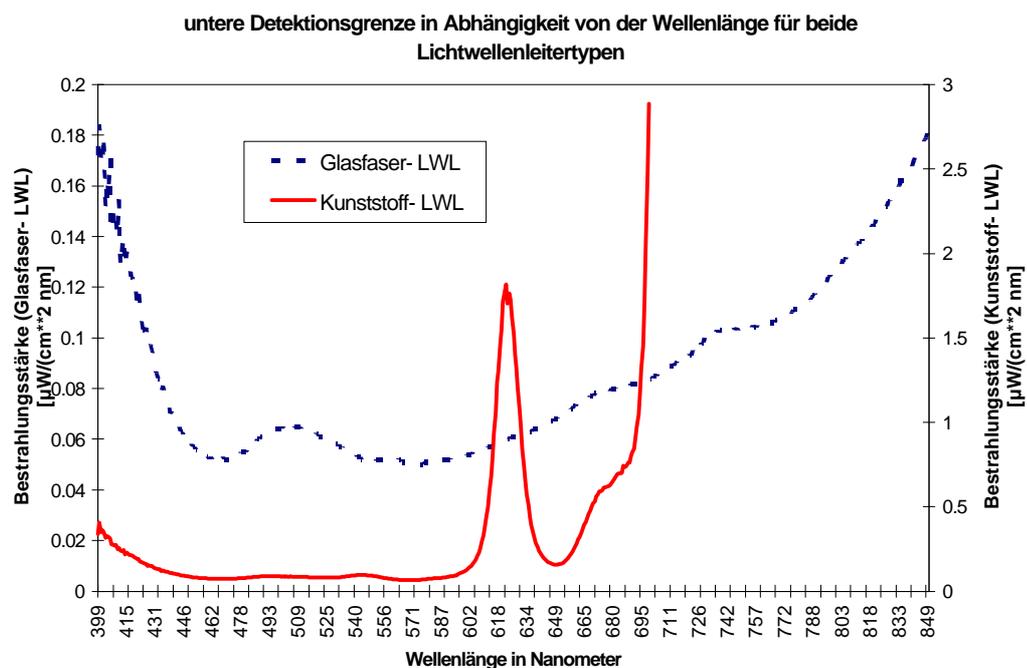


Abbildung 39: Darstellung der wellenlängenabhängigen unteren Detektionsgrenze der beiden entwickelten Sensortypen (Kunststoff- und Glasfaser- LWL).

Werden die Sensoren nicht kalibriert, sondern nach ihrer Montage sofort für Messungen verwendet, dann können die Fehler zwischen einzelnen Sensoren bis zu 30 % betragen. Speziell bei den Kunststoff- Lichtwellenleitern, deren Enden erst geschliffen werden müssen, ist eine Kalibrierung unumgänglich. Die über dem PAR- Wellenlängenbereich integrierte Nachweisgrenze ist in Abbildung 40 für die einzelnen Sensoren aufgetragen.

Die Nummerierung der Sensoren setzt sich dabei aus einer Gruppennummer N_G und einem Gruppenindex N_I zusammen (F - 26) und ermöglicht gleichzeitig eine Unterscheidung zwischen beiden Sensortypen.

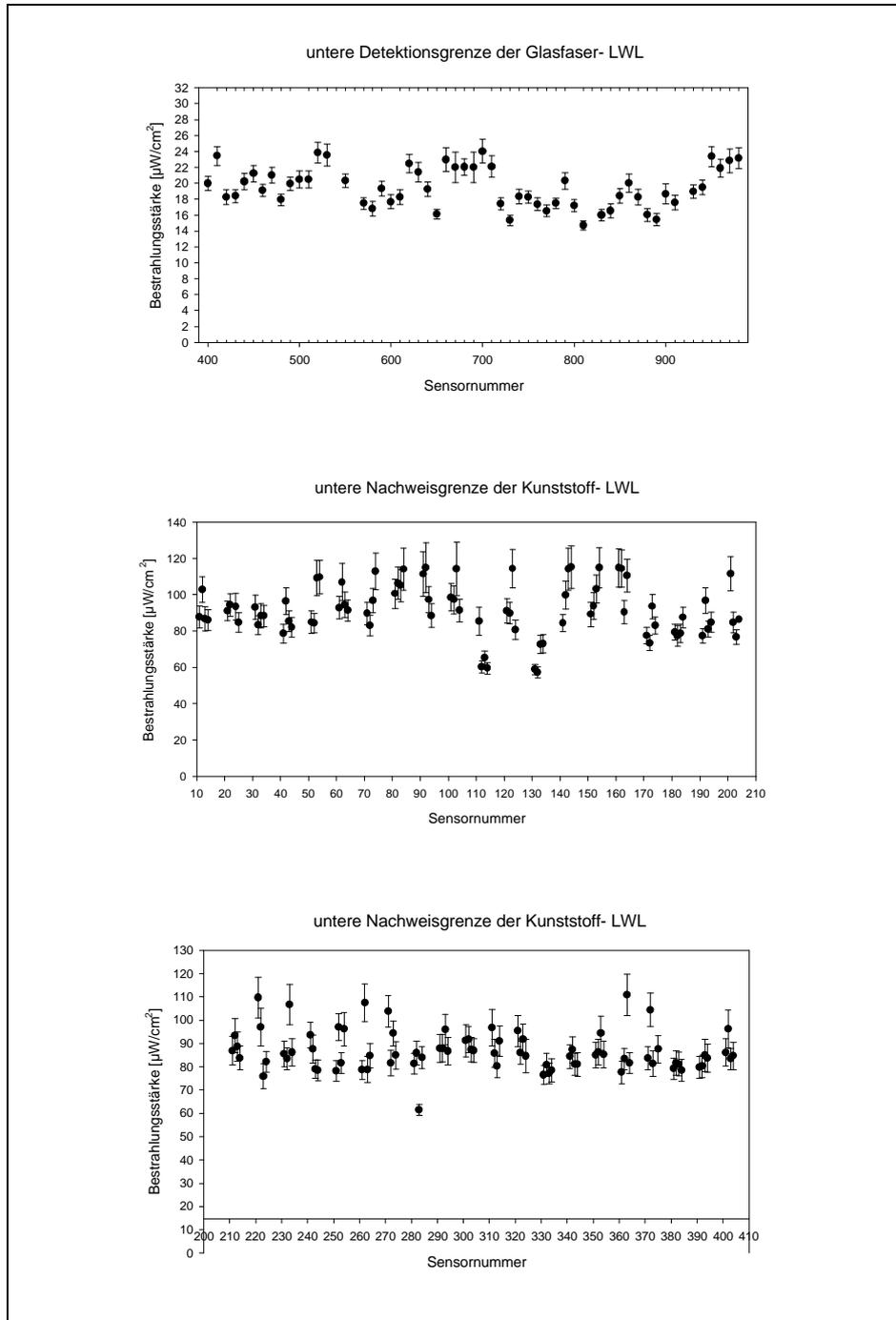


Abbildung 40: Nachweisgrenze mit Fehlerangaben für die verschiedenen Sensoren, integriert über dem PAR- Spektralbereich.

$$S = N_G * 10 + N_I$$

F - 26

$$N_G \in \mathbf{N}$$

$$N_I \quad 0 \quad \text{Glasfaser- LWL}$$

$$1 \quad N_I \quad 4 \quad \text{Kunststoff- LWL}$$

4.2 Anzahl von Messsensoren

Bei Waldbeständen, die gut durchforstet sind oder die relativ große Lücken haben, so dass die direkte Sonnenstrahlung durch Bestandeslücken bis in Bodennähe reicht, sind für die Bestimmung der im Mittel zur Verfügung stehenden PAR sehr viele Sensoren nötig (*Reifsnyder et al., 1971*). Handelt es sich dagegen um einen relativ homogenen Bestand und um bewölkte Himmelsbedingungen, bei denen die diffuse Strahlung überwiegt, so reduziert sich die Sensorenzahl erheblich (*Reifsnyder et al., 1971; Sattin et al., 1997*).

Eine Abschätzung der benötigten Sensoranzahl über die Standardabweichung, wie dies zum Beispiel bei *Sattin et al. (1997)* durchgeführt wurde, zeigt sich für die betrachtete Versuchsfläche als nicht praktikabel, da durch die relativ inhomogene Bestandesstruktur stets ein relativer Fehler von 30% bei der Mittelwertberechnung verbleibt.

Auf dieser Versuchsfläche wurde eine Methode angewendet, bei der schrittweise ein Sensor nach dem anderen systematisch aus der Berechnung entfernt wurde und aus den verbleibenden Sensoren die resultierende Strahlungsverteilung mittels Kriging (Programm Surfer 6.0) errechnet wurde. Die Ergebnisse wurden optisch miteinander verglichen und daraus die Mindestanzahl der Sensoren bestimmt, bei denen das Ergebnis nicht mehr als 10% von der Strahlungsverteilung bei maximaler Sensorzahl abwich.

Unterhalb von zwölf Sensoren verändert sich der Contour- Plot deutlich, wobei Randsensoren einen stärkeren Effekt auf die Verteilung haben als zentral gelegene Sensoren. Soll also die Strahlungsverteilung innerhalb eines Bestandes ermittelt werden, so sollten auf der Versuchsfläche mindestens fünfzehn Sensoren je Ebene befestigt werden, wobei die Randbereiche stärker besetzt sein müssen. Für alle unten gemachten Berechnungen wurden jeweils mindestens fünfzehn Sensoren pro Ebene eingesetzt. Alle Contour- und Oberflächen- Plots wurden mit dem Programm Surfer 6.0 im Kriging-Verfahren berechnet.

4.3 Die Strahlung zwischen 400 nm und 850 nm oberhalb und innerhalb des untersuchten Waldbestandes

Die folgende Untersuchung des integralen Strahlungsflusses beziehungsweise der spektralen Verteilung der Sonnenstrahlung zwischen 400 nm und 850 nm wurde für ausgesuchte Tage im Herbst 1999 durchgeführt. Dabei wurden die Strahlungsbedingungen an klaren Tagen (CS, Clear Sky) und bei stark bewölktem Himmel (OS, Overcast Sky) unterschieden. Diese Unterscheidung entspricht auch den Eingangsbedingungen für die Berechnung der Strahlungsverteilung für die durchgeführten Modellrechnungen. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen die Tagesgänge der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung (je 300 nm bis 3 μ m) dieser speziell betrachteten Tage (Tabelle 12), wobei die Strahlungsdaten jeweils mit planaren Sensoren (CM11, Kipp & Zonen) ermittelt wurden.

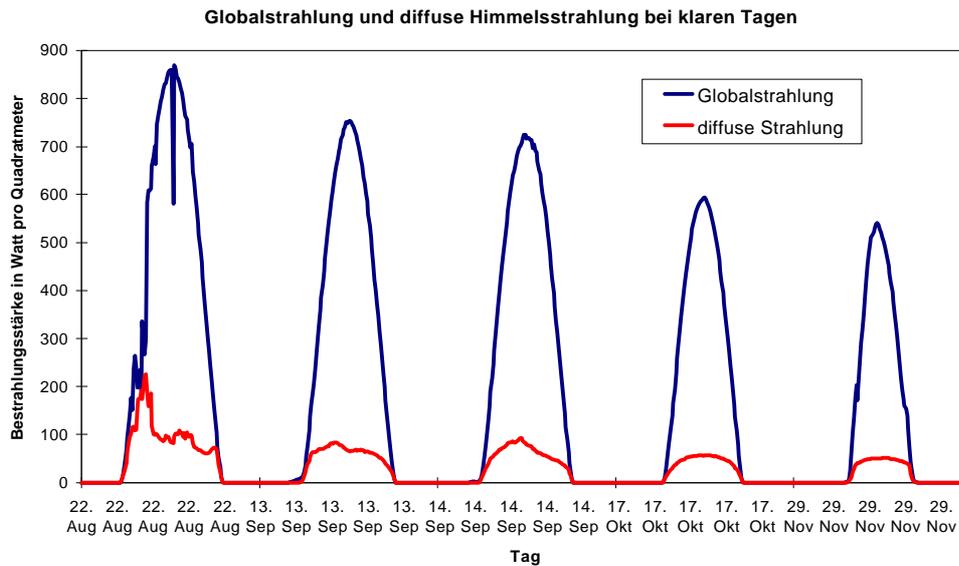


Abbildung 41: Globalstrahlung und diffuse Strahlung bei CS (Clear Sky)- Bedingungen der betrachteten Tage.

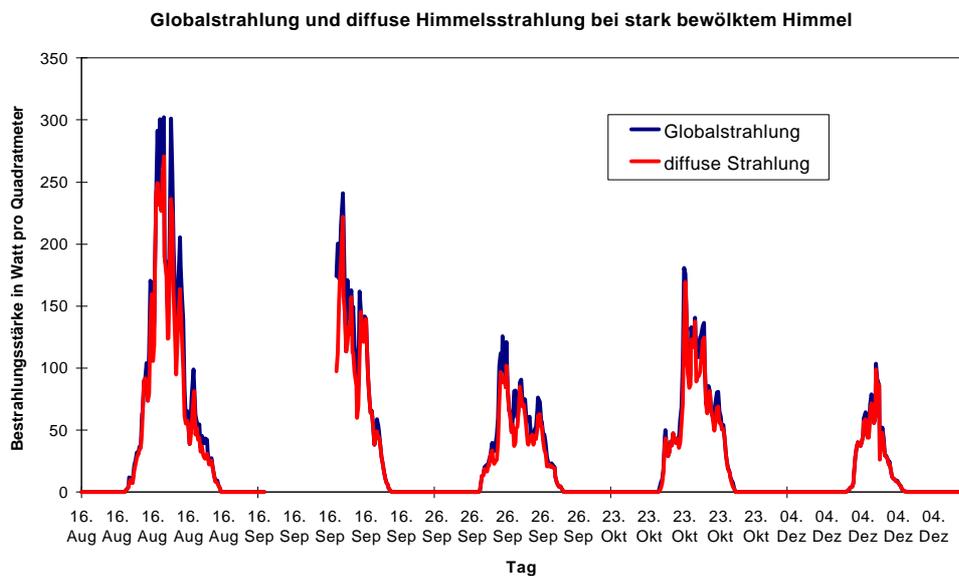


Abbildung 42: Globalstrahlung und diffuse Strahlung bei OS (Overcast Sky)- Bedingungen der betrachteten Tage.

In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist deutlich die Abnahme der Gesamtstrahlung von August bis Dezember zu sehen, was sich durch den Umlauf der Erde um die Sonne und der sich dadurch verändernden Mittags- Sonnenhöhe erklären lässt.

Tabelle 12: Zusammenstellung der näher betrachteten Tage bei klarem Himmel (CS) und bei stark bewölkten Verhältnissen (OS) 1999.

16. August	OS
22. August	CS
13. September	CS
14. September	CS
16. September	OS
26. September	OS
17. Oktober	CS
23. Oktober	OS
29. November	CS
4. Dezember	OS

Für den direkten Vergleich der Globalstrahlung mit den Strahlungswerten an klaren Tagen, die mit sphärischen Sensorempfangsflächen ermittelt wurden, muss der direkte Strahlungsanteil vorher mit dem Sinus der Sonnenhöhe korrigiert werden.

Auch bei stark bewölktem Himmel muss eine Korrektur durchgeführt werden, damit die Strahlungswerte von planaren und der Kosinuscharakteristik angepassten Sensoren mit den Strahlungswerten von sphärischen Sensoren verglichen werden können. Der Korrekturwert beträgt hier $3/4 \cdot \delta$. Mit diesem Faktor muss der Wert von planaren Sensoren multipliziert werden, um die Werte vergleichen zu können. Dies gilt allerdings nur bei homogener Strahlungsverteilung im Raumwinkel. Innerhalb des Bestandes, bei dem die seitlich auftreffende Strahlung deutlich geringer ist als im Freiland, ist diese Korrektur so nicht möglich.

Bei folgenden Betrachtungen werden die Ergebnisse der Strahlungsgrößen in den Einheiten der Bestrahlungsstärke [W/m^2] angegeben. Nur bei dem Vergleich der Messergebnisse mit den Modell- Ergebnissen wird auf die Photonenflussdichte [$\mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$] zurückgegriffen. Nach *McCree (1972b)* beträgt der Konvertierungsfaktor für klare Tage $4,57 \mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}$ pro W/m^2 ($[\mu\text{E}/\text{J}]$) und nach *Britton und Dodd (1976)* für einen bedeckten Himmel $4,24 \mu\text{E}/\text{J}$ (Mikroevinstein/Joule). Eigene Messungen mit den spektralen Daten der in Tabelle 12 aufgeführten Tage ergaben im Mittel für klare Tage $(4,59 \pm 0,03) \mu\text{E}/\text{J}$ und für bedeckte Tage $(4,41 \pm 0,03) \mu\text{E}/\text{J}$.

4.3.1 Die integrale PAR- Bestrahlungsstärke

4.3.1.1 Der Anteil von PAR und NNIR an der Globalstrahlung im Freiland

Der Anteil der integralen Bestrahlungsstärke von PAR (400 nm - 700 nm) und von NNIR (700 nm - 850 nm) an der Globalstrahlung wurde für die in Tabelle 12 angegebenen Tage ermittelt. Es zeigt sich, dass der relative Anteil sowohl von PAR als auch von NNIR an der Globalstrahlung (G) im Freiland während eines Tages kaum Variationen zeigt. Diese Anteile blieben auch in dem untersuchten Zeitraum von August bis Dezember 1999 für die beiden Bedingungen OS und CS relativ konstant (Abbildung 43 und Abbildung 44).

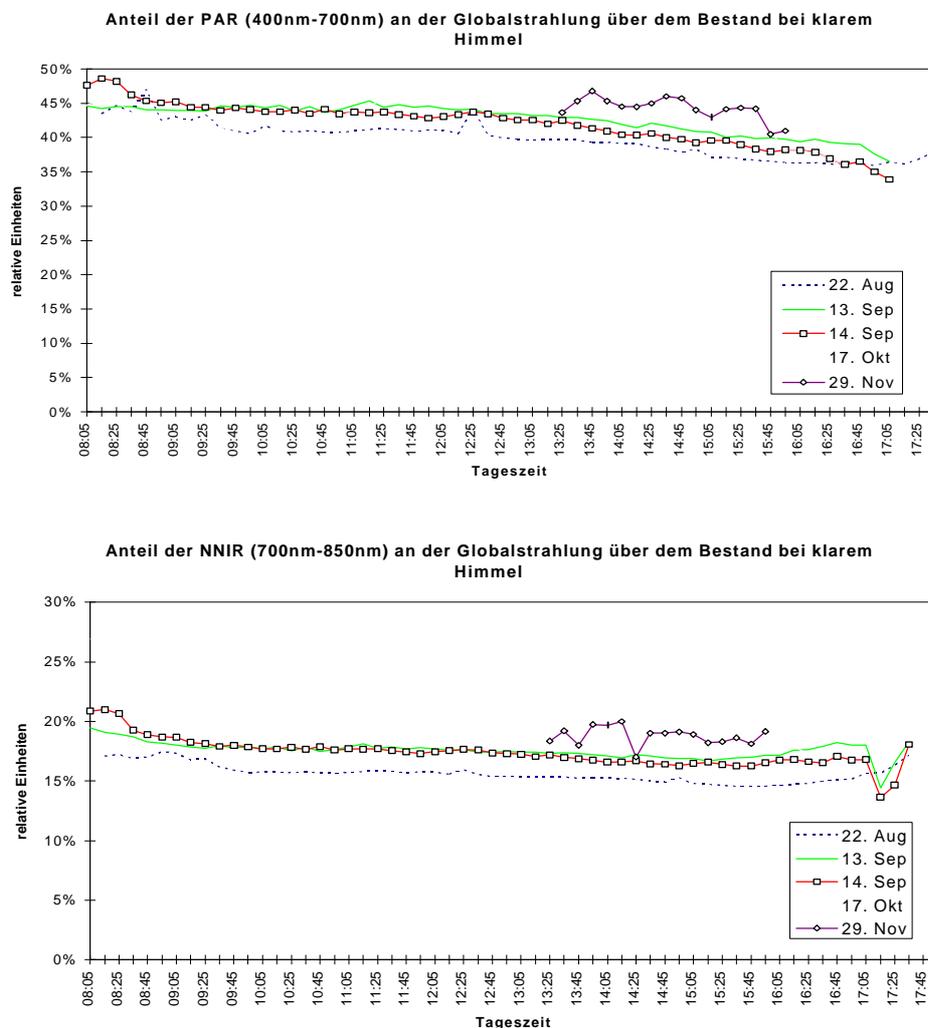


Abbildung 43: Tagesgänge der integralen Anteile von PAR und NNIR an klaren (CS) Tagen im untersuchten Zeitraum von August bis Dezember 1999.

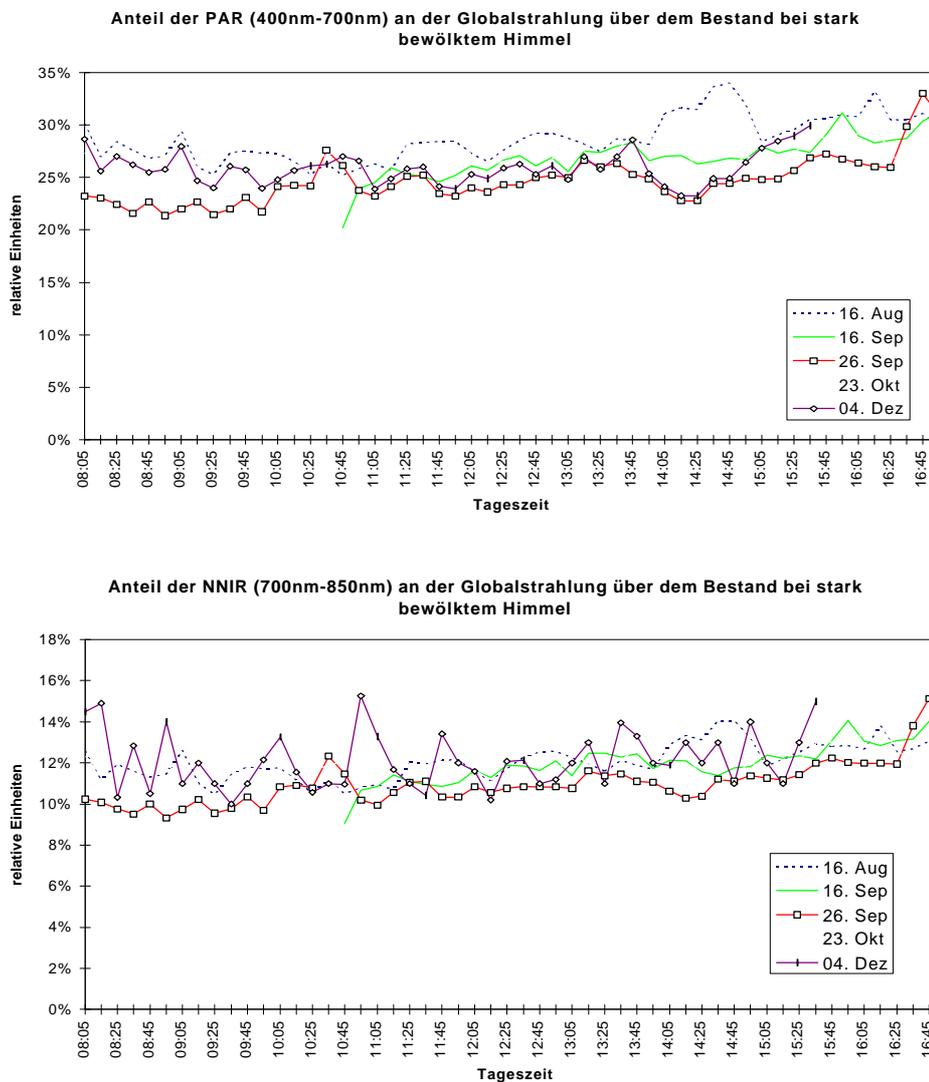


Abbildung 44: Tagesgänge der integralen Anteile von PAR und NNIR an stark bewölkten (OS) Tagen im untersuchten Zeitraum von August bis Dezember 1999.

Unterschiede ergeben sich allerdings in der Höhe der prozentualen Anteile zwischen CS- und OS- Bedingungen. So liegt der Anteil der PAR an der Globalstrahlung für CS- Tage zwischen etwa 40 - 50% und für OS- Tage bei etwa 20 - 30%. Der NNIR- Anteil zeigt ein ähnliches Verhalten. Er liegt an CS- Tagen bei 15 - 25% und bei OS- Tagen bei etwa 10 - 15% der Globalstrahlung.

4.3.1.2 PAR- Verteilung in Bodennähe unter dem Bestand

Während der PAR- Anteil an der Globalstrahlung im Freiland kaum Variationen zeigt, beeinflussen die Bestandesstruktur und die Bestandesdichte die integralen PAR- Gegebenheiten unterhalb des Bestandes. Durch die unterschiedliche Bestandesstruktur können Lücken entstehen, die das Sonnenlicht nahezu ungehindert auf den Bestandesboden treffen lassen.

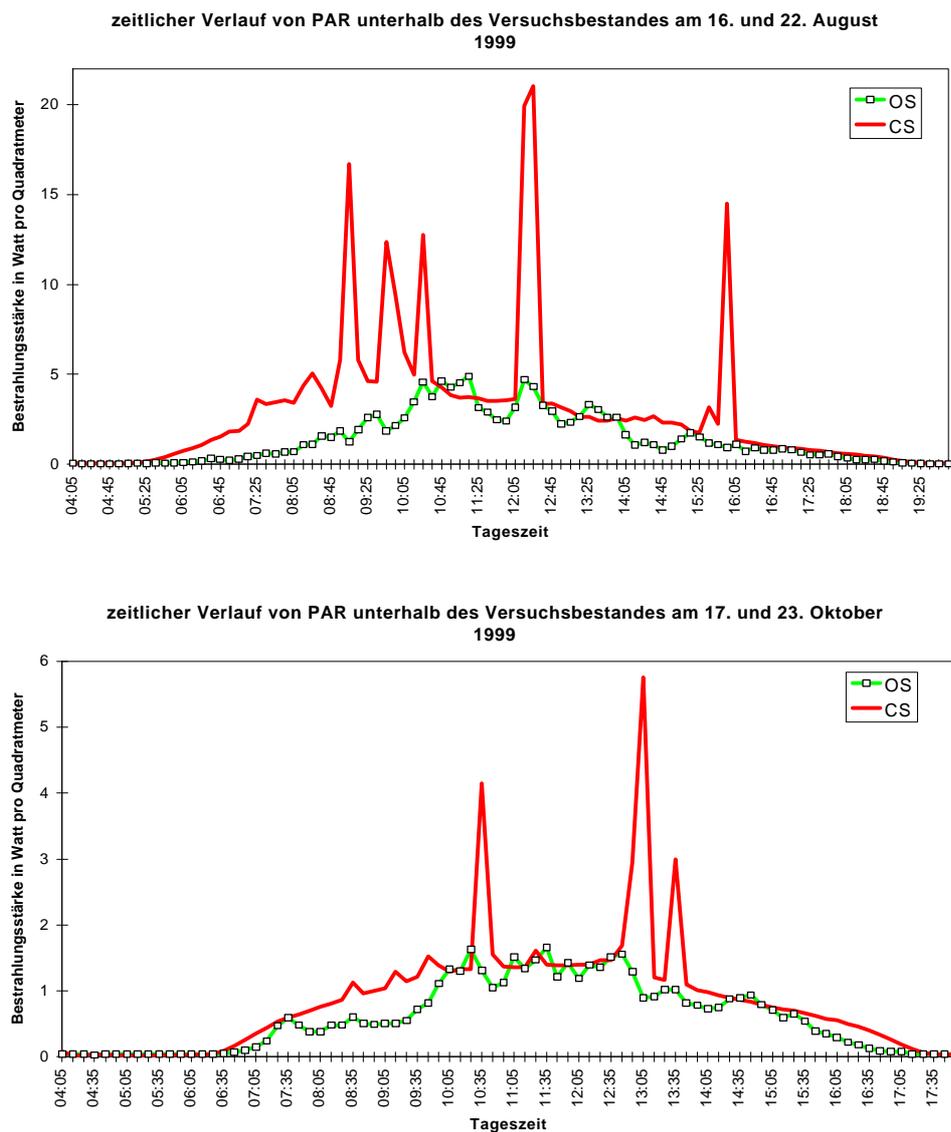


Abbildung 45: Tagesgang von PAR unterhalb des Bestandes für jeweils einen Sensor an zwei Tagen im August und Oktober (sowohl bei CS- als auch bei OS- Bedingungen).

Abbildung 45 zeigt den Tagesgang der Bestrahlungsstärke am Bestandesboden am Beispiel eines im Zentrum der Versuchsfläche montierten Messensors. Dabei wurden jeweils ein CS- und ein OS- Tag im August und im Oktober ausgewählt. Es ist zu erkennen, dass bei OS- Bedingungen keine Spitzen in der Bestrahlungsstärke auftreten und das Maximum etwa zum höchsten Sonnenstand auftritt. Bei CS- Bedingungen zeigen sich wegen Bestandeslücken Sonnenflecken am Bestandesboden, die sich als Spitzen im Tagesgang zeigen (z.B. *Ashton, 1992*). Für die Tage im August können diese Spitzen etwa 10% der im Freiland gemessenen PAR- Bestrahlungsstärke annehmen, im Oktober wurden hier nur 3% gemessen. Dies ist mit eine Folge der niedrigeren Sonnenhöhe über dem Horizont im Oktober gegenüber der im August. Auch bei OS- Tagen zeigt sich eine kleine Variation zwischen August mit 2% und Oktober mit 1% der Freilandbedingungen. Die räumliche Verteilung der PAR- Strahlung am Bestandesboden ist am Beispiel eines CS- Tages (Abbildung 46) und eines OS- Tages (Abbildung 47) jeweils bei höchstem Sonnenstand dargestellt.

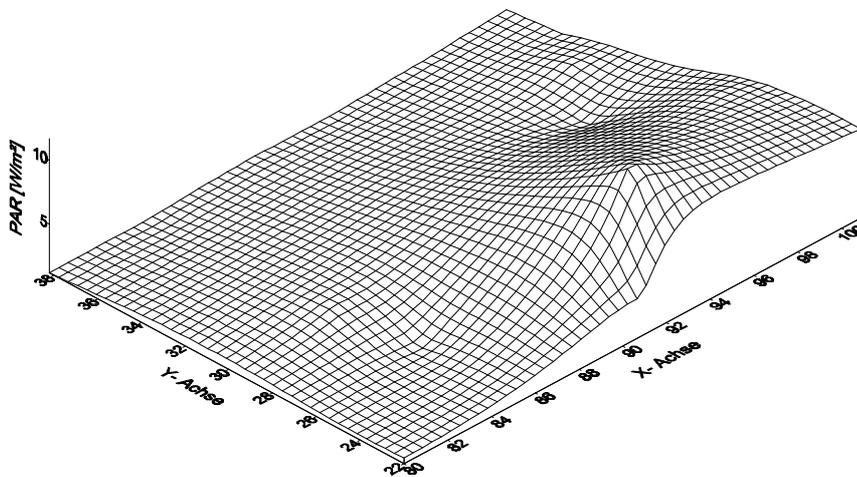


Abbildung 46: Die integrale PAR- Verteilung unter dem Versuchsbestand am 22.08.1999 (CS) bei höchstem Sonnenstand.

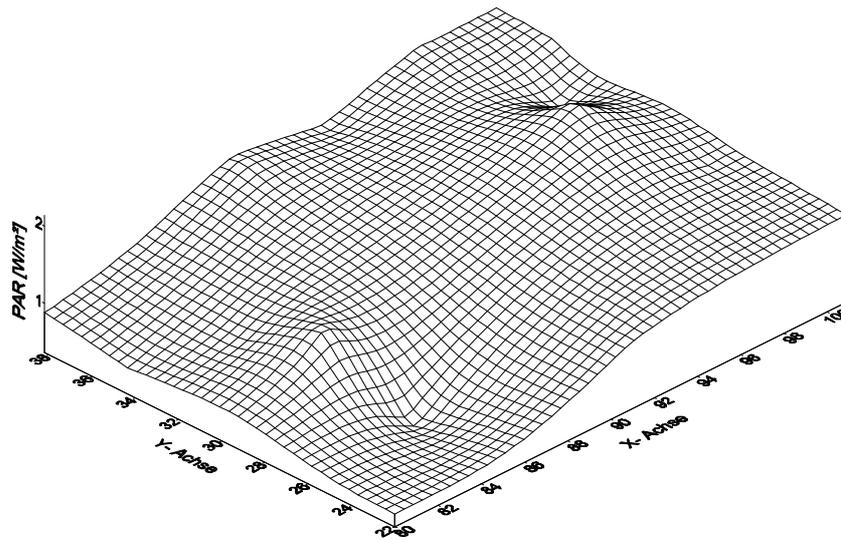


Abbildung 47: Die integrale PAR- Verteilung unter dem Versuchsbestand am 16.08.1999 (OS) bei höchstem Sonnenstand.

An OS- Tagen zeigt sich eine homogenere Strahlungsverteilung unter dem Bestand als bei CS- Bedingungen. Diese Abbildungen stellen nur Momentaufnahmen der Strahlungsverteilung dar. Speziell unter CS- Bedingungen variiert das PAR- Strahlungsfeld durch die oben erwähnten Sonnenflecken sehr stark, wobei Unterschiede mit Faktor 10 und 20 auftreten können.

4.3.1.3 Diskussion der integralen Verhältnisse

Der Tagesgang des PAR/G- Verhältnisses über dem Bestand ist sowohl für CS- als auch für OS- Tage sehr konstant. Bei CS- Tagen liegt dieses Verhältnis bei etwa 40 - 50% und für OS- Tage bei etwa 20 - 30%, was beispielsweise mit Beobachtungen von *McCree (1966)*, *Britton und Dodd (1976)*, *Szeicz, (1974)*, *Langholz und Häckel (1985)* und *Udo und Aro (1999)* gut im Einklang steht. Der NNIR- Anteil an der Globalstrahlung ist an CS- Tagen mit 15 - 25% ebenfalls höher als bei OS- Tagen mit 10 - 15%. Der höhere relative Anteil der kurzwelligeren PAR an der Globalstrahlung bei CS- Verhältnissen wird durch die Rayleigh- Streuung bei klarem Himmel bestimmt. Unter OS- Bedingungen herrscht Mie- Streuung vor. Der höhere NNIR- Anteil unter CS- Bedingungen ist dagegen von der erhöhten direkten Strahlung verursacht.

Unterhalb des Bestandes zeigt sich ein deutlicher Tagesgang von PAR. Im Mittel werden PAR- Anteile zwischen 1% und 3% der Freilandsituation erreicht, wobei der PAR- Anteil unterhalb des Fichten- Bestandes höher ist als unter dem Buchenbestand. Dies deckt sich mit Werten, die zum Beispiel von *Zavitkovski (1982)*, *Ehrhardt und van Eimern (1983)* und *Ashton (1992)* ermittelt wurden. Die Spitzen in der Bestrahlungsstärke an CS- Tagen werden durch Bestandeslücken hervorgerufen, durch die ein Teil der direkten Freilandstrahlung in den Bestand eindringen kann. Im August wird dabei bis zu 10% der im Freiland gemessenen PAR- Bestrahlungsstärke gemessen, im Oktober nur 3%. Der Unterschied zwischen August- und Oktoberwerten ist mit eine Folge der niedrigeren Oktober- Sonnenhöhe über dem Horizont gegenüber der im August. Auch bei OS- Tagen zeigt sich eine kleine Variation zwischen August mit 2% und Oktober mit 1% der Freilandbedingungen.

4.3.2 Die spektrale Zusammensetzung der Strahlung zwischen 400 nm und 850 nm

Die spektrale Zusammensetzung der Strahlung oberhalb und unterhalb des untersuchten Fichten- Buchen- Mischbestandes soll unter CS- und OS- Bedingungen untersucht werden. Wie in Kapitel 2 beschrieben, sollte sich unterhalb des Bestandes der Anteil des Grün- Bereiches (**G**, 500 nm - 600 nm) an PAR relativ zum Blau (**B**, 400 nm - 500 nm)- und Orange-Rot- Bereich (**OR**, 600 nm - 700 nm) erhöhen. Des Weiteren ist eine relative Erhöhung des NNIR- Anteils (Near **NIR**, 700 nm - 850 nm) am Sonnenspektrum unterhalb des Bestandes zu erwarten. Als Indikator für die relative Belaubungsdichte kann das Verhältnis des Far Red (**FR**, 720 nm - 740 nm) zum Red (**R**, 640 nm - 670 nm) herangezogen werden. Je mehr grüne Blattfläche von der Sonnenstrahlung passiert werden muss, desto höher ist der Wert des FR:R- Verhältnisses. In der Literatur findet häufig der Kehrwert dieses Verhältnisses Anwendung (z.B. *Schimpf und Danz, 1999*). Wegen der direkten Korrelation zwischen dem FR:R- Verhältnis und der durch die Sonnenstrahlung passierten Belaubung wird hier immer von dem FR:R- Verhältnis Gebrauch gemacht. Die Farbenbezeichnungen stehen im Folgenden für die entsprechenden Wellenlängenbereiche.

4.3.2.1 Das Sonnenspektrum über dem Bestand

4.3.2.1.1 Der Anteil von Blau, Grün, Rot und NNIR am Spektrum

Abbildung 49 bis Abbildung 51 zeigen die zeitlichen Verläufe der integralen Spektralanteile Blau, Grün, Orange-Rot und NNIR über dem Bestand bei CS- und OS-Bedingungen. Dabei zeigt sich bei CS- Bedingungen (Abbildung 48 und Abbildung 49) ein spezieller Tagesgang, bei OS- Bedingungen bleiben die Strahlungsanteile der einzelnen Farben relativ konstant.

Morgens und abends umfasst der NNIR- und der OR- Anteil bei CS- Bedingungen zusammen etwa 60 - 70% und sinkt um die Mittagszeit auf etwa 53% ab. Die Blau- und Grünanteile sind dagegen morgens und abends am niedrigsten und erreichen zum höchsten Sonnenstand ihr Maximum. Die Anteile der einzelnen Farben bleiben ab einer Sonnenhöhe von etwa 20° über dem Horizont auf einem relativ konstanten Wert (Abbildung 48 und Abbildung 49), die mit den Werten bei OS- Bedingungen vergleichbar sind.

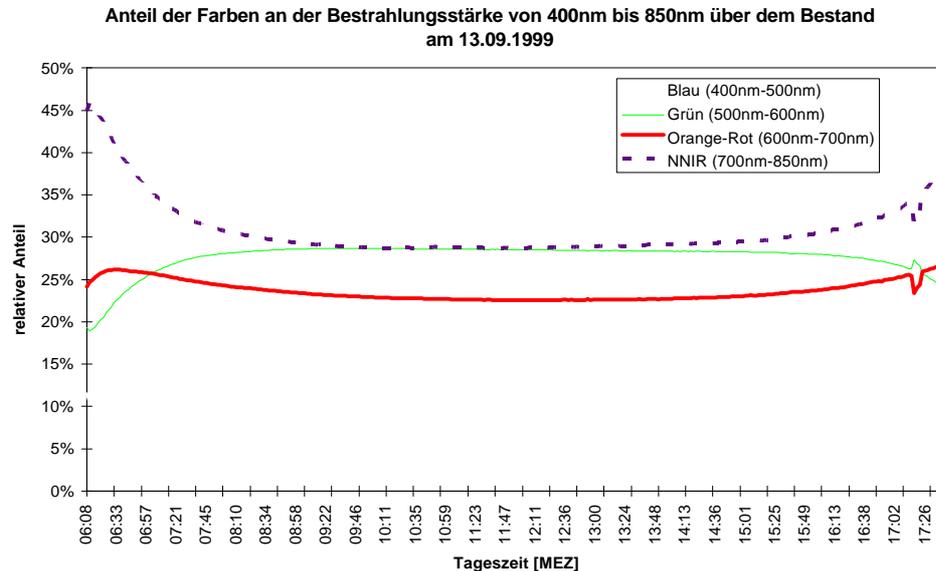


Abbildung 48: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei wolkenlosem Himmel am 13.09.1999.

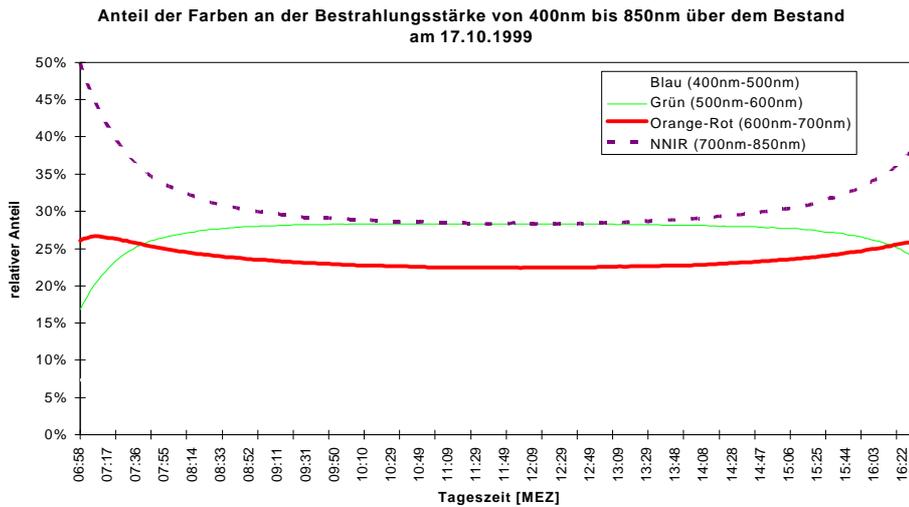


Abbildung 49: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei wolkenlosem Himmel am 17.10.1999.

Bei OS- Bedingungen (Abbildung 50 und Abbildung 51) ist die Situation ganz anders. Über dem Bestand ist kein Tagesgang in den einzelnen Anteilen von Blau, Grün, Orange-Rot und NNIR an der Strahlung zwischen 400 nm und 850 nm zu erkennen. Diese Anteile sind über die Monate hin konstant und liegen für Blau und Rot bei 21%, für Grün bei circa 28% und für NNIR bei ungefähr 30%. Diese Relativwerte bleiben auch bei größeren Schwankungen im Absolutwert der Bestrahlungsstärke konstant.

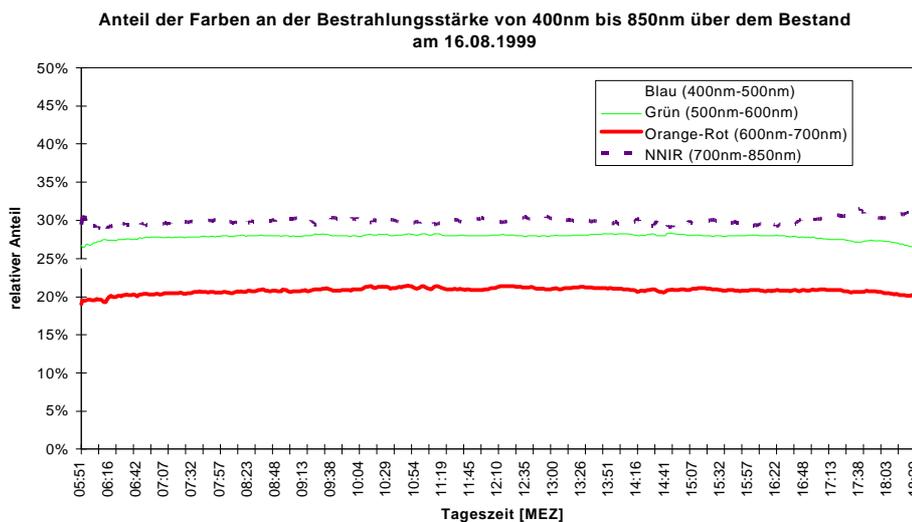


Abbildung 50: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei bewölktem Himmel am 16.08.1999.

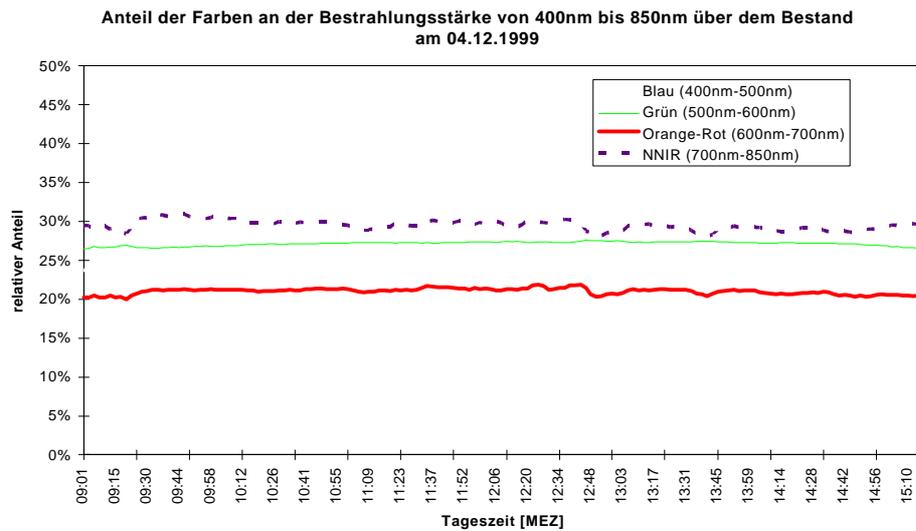


Abbildung 51: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei bewölktem Himmel am 04.12.1999.

4.3.2.1.2 FR:R (Far Red : Red)- Verhältnis

Das FR:R (Far Red:Red)- Verhältnis ist sowohl für klare Tage als auch für einen stark bewölkten Himmel über die gesamte Tageszeit sehr konstant (Abbildung 52). An OS-Tagen ist das FR:R- Verhältnis im Mittel ebenso groß wie unter CS- Bedingungen. Generell ist aber über dem Bestand der Rotanteil größer als der FR- Anteil. Diese Verhältnisse zeigen sich bei allen untersuchten Tagen während der Messphase.

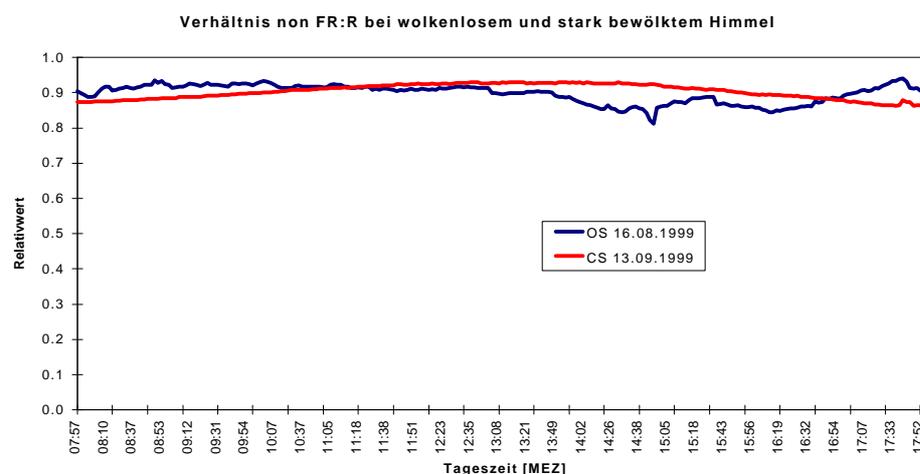


Abbildung 52: Tagesgang des berechneten Verhältnisses von FR (720 nm bis 740 nm) zu R (670 nm bis 690 nm) am Beispiel eines CS- und eines OS- Tages.

4.3.2.2 Die wellenlängenselektive Dämpfung innerhalb des Bestandes

4.3.2.2.1 Die Verhältnisse zwischen PAR und NNIR im Sonnenspektrum

Beim Durchgang des Sonnenlichtes durch die Baumkronen verändert sich durch die Streucharakteristik der grünen Pflanzenteile die spektrale Zusammensetzung der Strahlung. Je größer die wirksame Blattfläche ist, desto stärker wird der Strahlungsbereich von 400 nm bis 700 nm (PAR) gegenüber dem NNIR (700 nm bis 850 nm) gedämpft (z. B. *Anisimov und Fukshansky, 1993*).

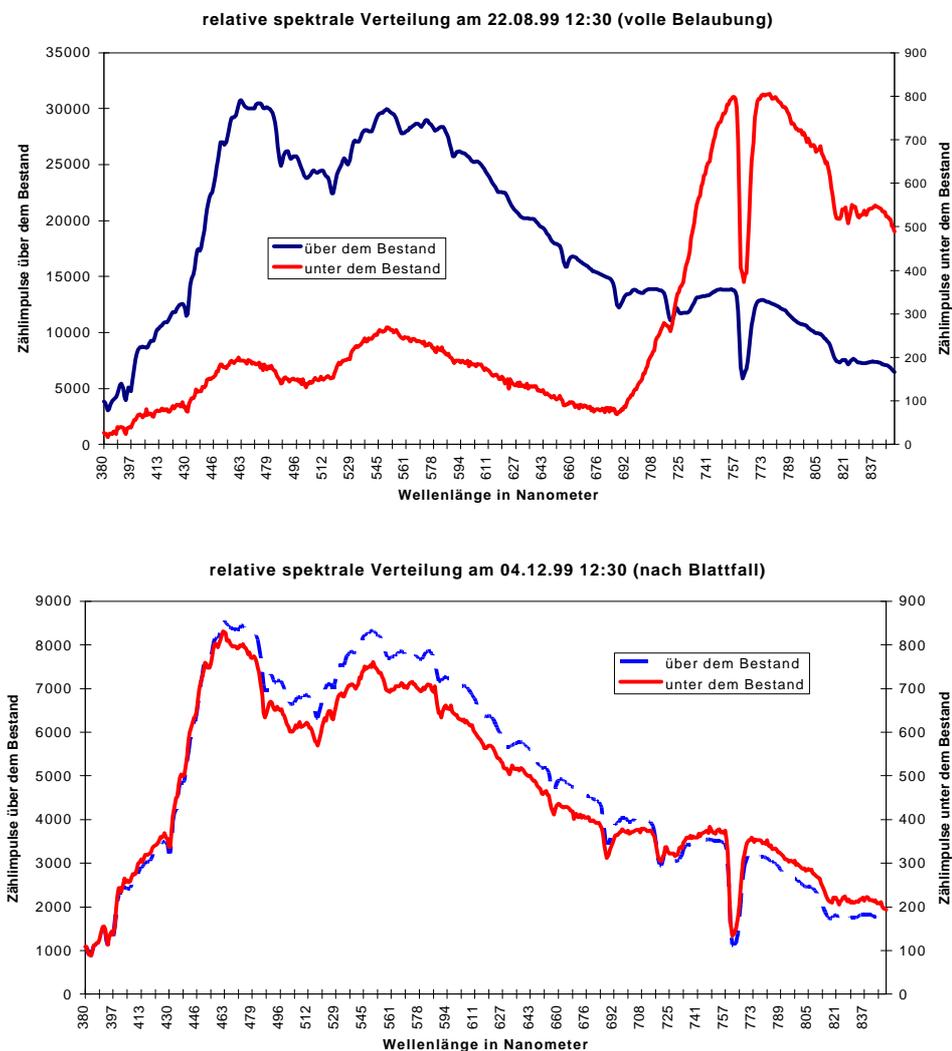


Abbildung 53: Relative spektrale Verteilung über und unter dem Waldbestand vor und nach Laubfall.

Diese Überhöhung im NNIR- Bereich ist in Abbildung 53 für den 22.08.1999 gut zu erkennen. Hat der Laubfall bei den Buchenblättern eingesetzt, verringert sich die

wirksame grüne Laubfläche und damit die Dämpfung im PAR. Abbildung 53 zeigt diesen Sachverhalt für den 04.12.1999, wo die relative Überhöhung nur noch andeutungsweise zu erkennen ist.

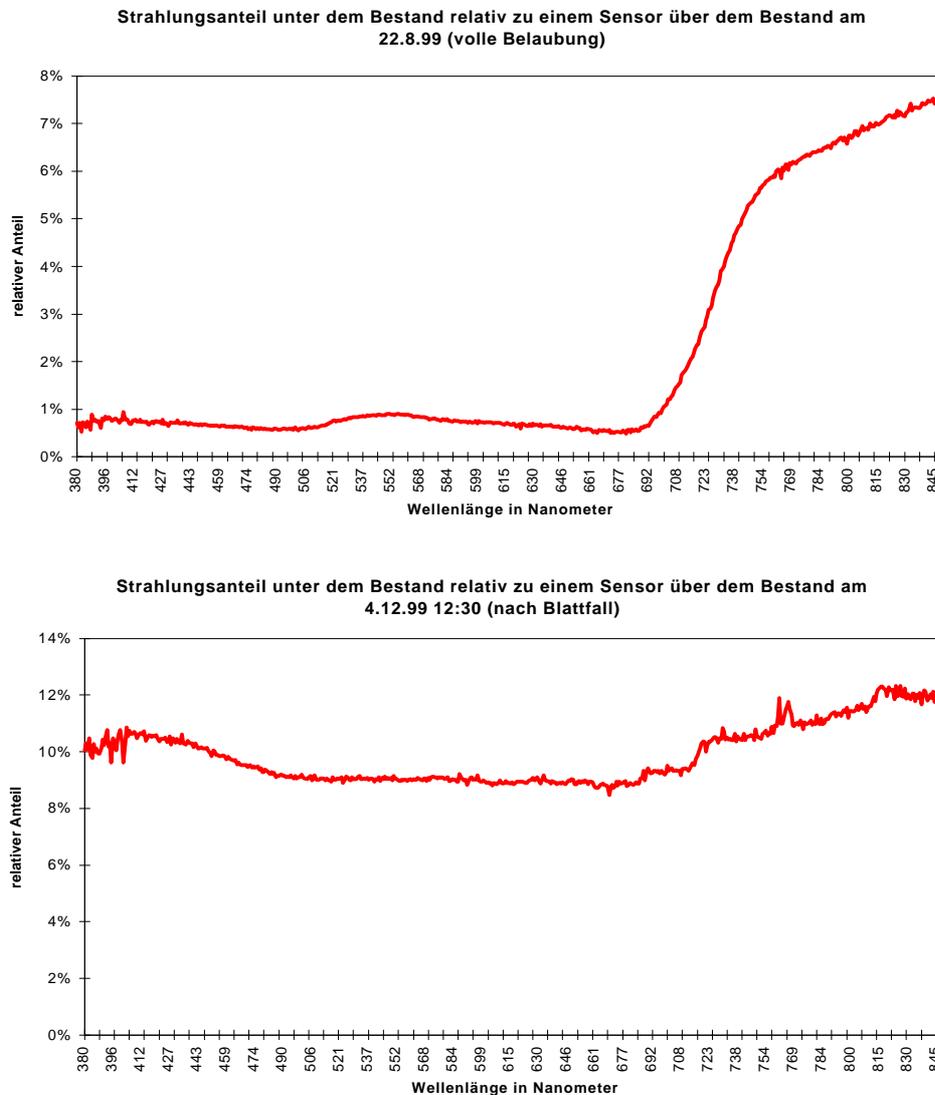


Abbildung 54: Vergleich des relativen Strahlungsanteils eines Sensors in Bodennähe zu dem Signal eines über dem Bestand angebrachten Sensors (sowohl vor als auch nach Blattfall).

Durch den Vergleich der spektralen Strahlungsanteile unter dem Bestand für den 22.08.1999 und den 04.12.1999 mit Sensormessungen über dem Bestand ist dieser Sachverhalt auch quantitativ zu erfassen.

Unter dem Bestand reduziert sich der Anteil von PAR bei voller Belaubung auf etwa 1% der Freilandbedingungen, der Anteil von NNIR liegt dagegen im Mittel bei etwa 5%. Nach Laubfall (04.12.1999) ist der Unterschied zwischen PAR und NNIR nahezu aufgehoben und liegt zwischen 10% und 12% gegenüber dem Freiland (Abbildung 54).

4.3.2.2.2 Die spektrale Verschiebung innerhalb des PAR- Bereiches

Neben der relativen Überhöhung im NNIR gegenüber der PAR gibt es auch innerhalb des PAR- Bereiches eine spektrale Verschiebung, die durch die grünen Pflanzenteile mit verursacht ist. Außerdem wirken sich die unterschiedlichen Strahlungsverhältnisse bei CS- und OS- Tagen auf diese Verteilung aus.

CS- Bedingungen:

Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen jeweils die prozentualen Anteile der einzelnen Farbbereiche Blau, Grün und Orange-Rot an der PAR unter CS- Bedingungen unterhalb des Bestandes.

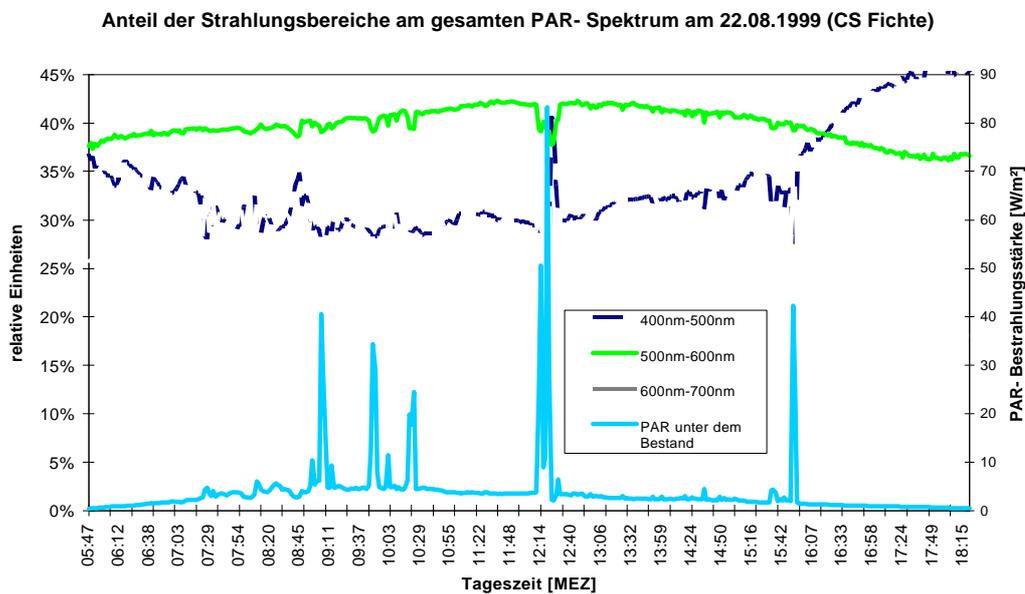


Abbildung 55: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).

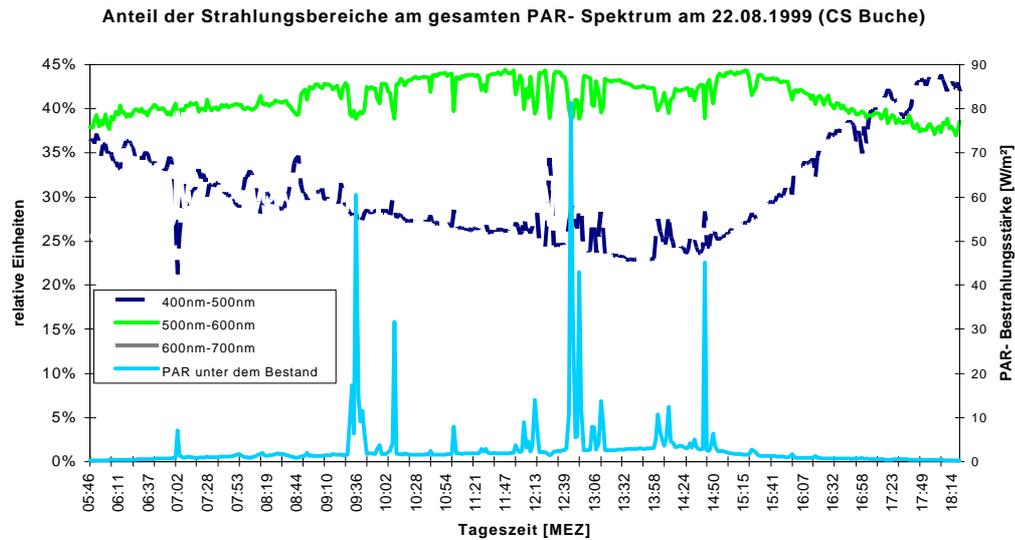


Abbildung 56: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).

Die Tagesgänge der Farbbereiche zeigen sowohl für die Fichtengruppe als auch für die Buchengruppe einen ähnlichen Verlauf. Der Grünanteil an der PAR erreicht zur Mittagszeit unter dem Bestand etwa 42%, was ungefähr Freilandbedingungen entspricht. Die Blau- und Orange-Rot- Anteile zeigen dagegen im Vergleich zum Freiland eine völlig andere Charakteristik. Ist der Blauanteil an der PAR im Freiland morgens und abends am kleinsten, so erreicht er im Bestand dort ein Maximum. Das gegenteilige Verhalten zeigt sich im Orange-Rot- Bereich. Hier tritt das Maximum etwa zur Mittagszeit auf. Bei CS- Bedingungen gibt es kaum Unterschiede zwischen der Fichten- und Buchengruppe. Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen die relative spektrale Veränderung der einzelnen Farben (Blau, Grün und Orange-Rot) in Bezug zu den Freilandgegebenheiten. Der spektrale Anteil von Blau an der PAR erhöht sich unter dem Bestand morgens um etwa 15% und abends um circa 25%. Außerdem sinkt der Rotanteil an PAR im Vergleich zum Freiland um etwa 15% ab. Eine größere Dämpfung der Blau- und Rotanteile an der PAR durch die grünen Pflanzenteile und damit ein erhöhter grüner Strahlungsanteil zeigt sich unter CS- Bedingungen nur um die Mittagszeit. Nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang dominiert der Blauanteil am PAR- Spektrum.

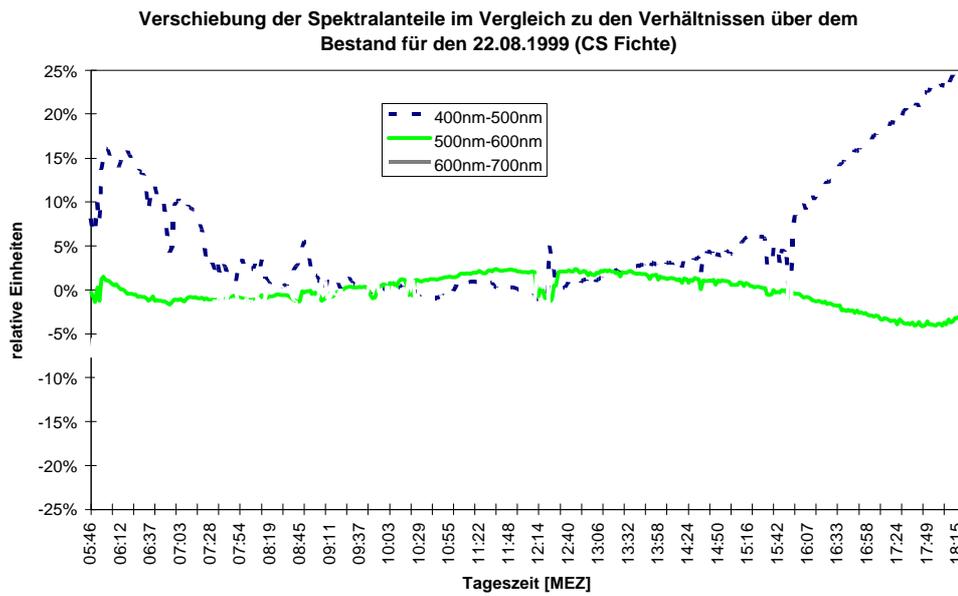


Abbildung 57: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).

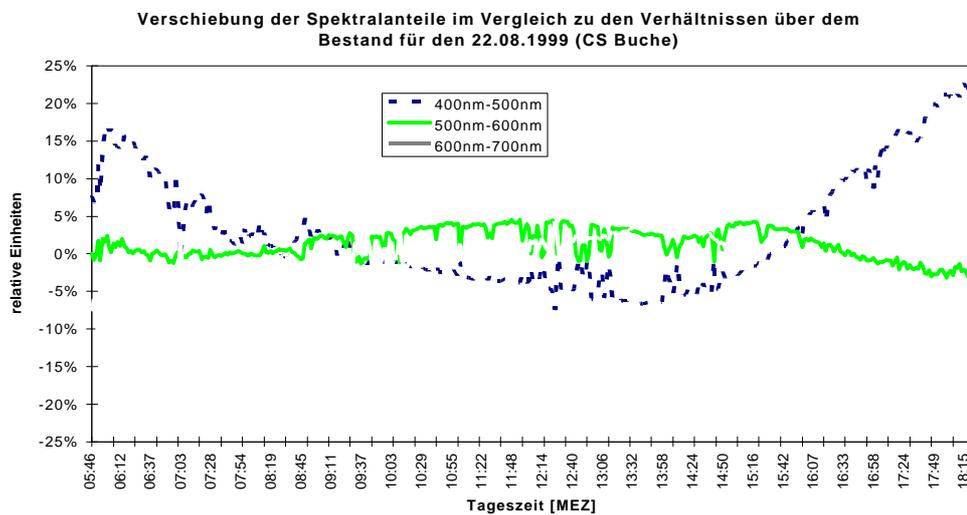


Abbildung 58: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).

OS- Bedingungen:

Unter OS- Verhältnissen zeigt sich im Prinzip ein ähnliches Verhalten. Auch hier ist der Blauanteil an PAR morgens und abends etwas erhöht. Der Orange-Rot- Anteil ist dagegen zu diesen Zeiten wieder etwas niedriger als der über dem Bestand. Der Grünanteil zeigt kaum Veränderungen (Abbildung 59 und Abbildung 60).

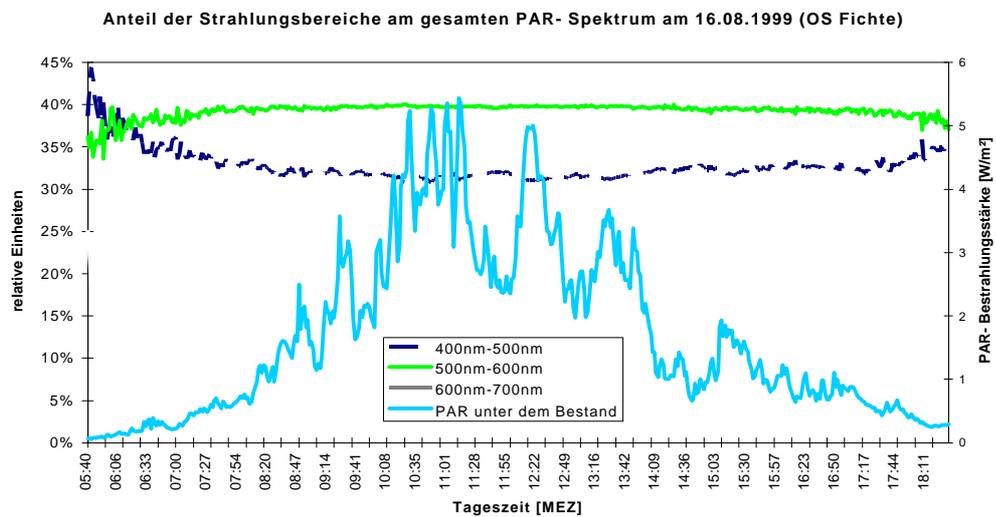


Abbildung 59: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).

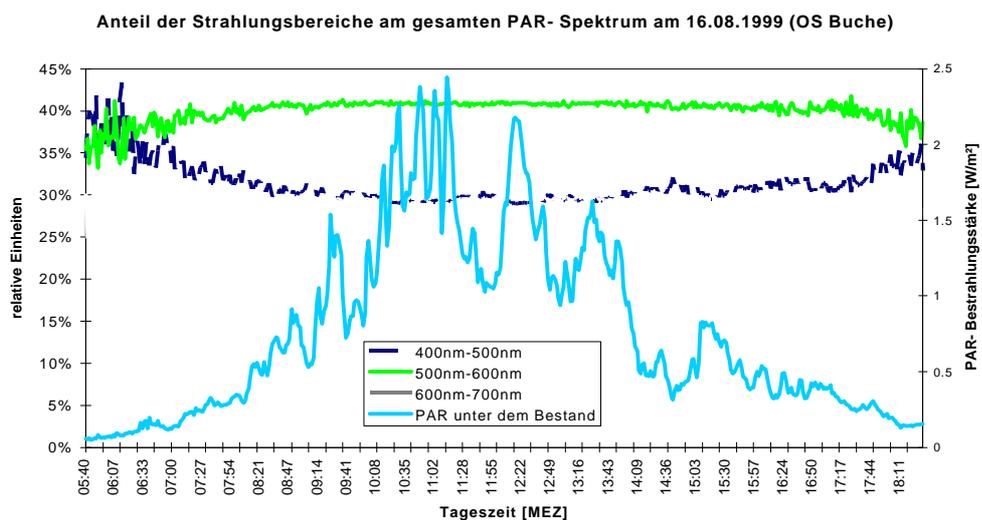


Abbildung 60: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).

Bei OS- Bedingungen gibt es aber einen deutlichen Unterschied zwischen der Buchen- und der Fichtengruppe. Bei der Fichtengruppe ist der Blau- Anteil relativ zu den Freilandgegebenheiten um etwa 2% erhöht und der Orange-Rot- Anteil um 1-2% verringert. Der Grün- Anteil bleibt dagegen nahezu unverändert (Abbildung 61).

Bei der Buchengruppe (Abbildung 62) ist ab einer Sonnenhöhe von etwa 20° über dem Horizont der Blau- und Orange-Rot- Anteil an PAR relativ zum Freiland kleiner, der Grün- Anteil am Spektrum nimmt dagegen deutlich zu. Unter OS- Bedingungen ist daher unter der Buchengruppe die Strahlung „grüner“ als über dem Bestand.

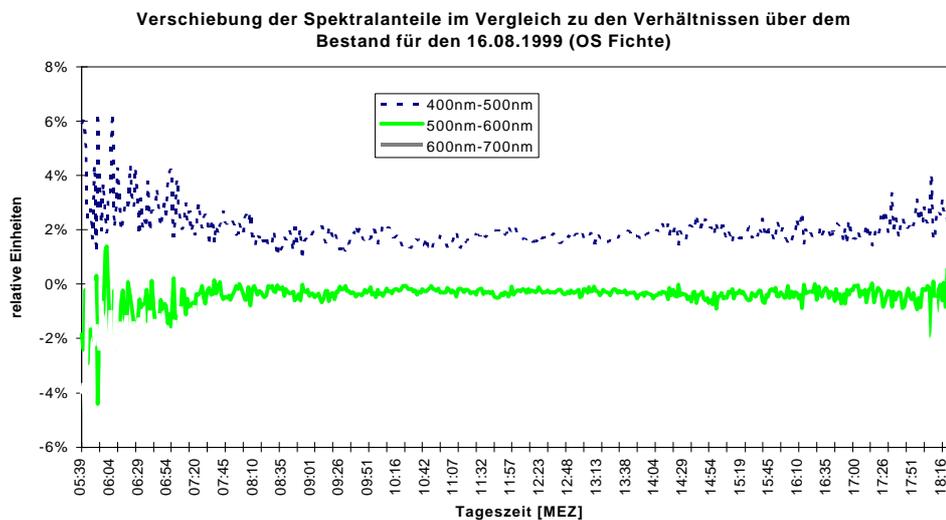


Abbildung 61: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (CS).

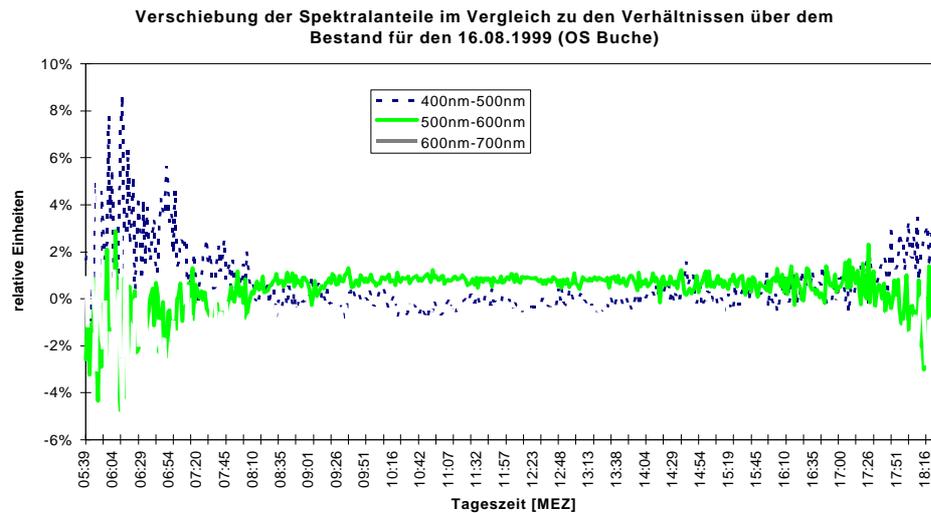


Abbildung 62: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).

4.3.2.2.3 FR:R (Far Red : Red)- Verhältnis

Das FR:R- Verhältnis ist über dem Bestand an CS- und an OS- Tagen stets kleiner als eins. In Abbildung 63 und Abbildung 64 sind jeweils für CS- und OS- Bedingungen die Tagesgänge der Verhältnisse im Höhenprofil innerhalb des Bestandes dargestellt. Das FR:R- Verhältnis nimmt dabei von oben nach unten zu. Trifft die Sonnenstrahlung durch Bestandeslücken fast ungehindert auf den Boden (CS- Tage), so erreicht das Verhältnis etwa Freilandbedingungen (Abbildung 63).

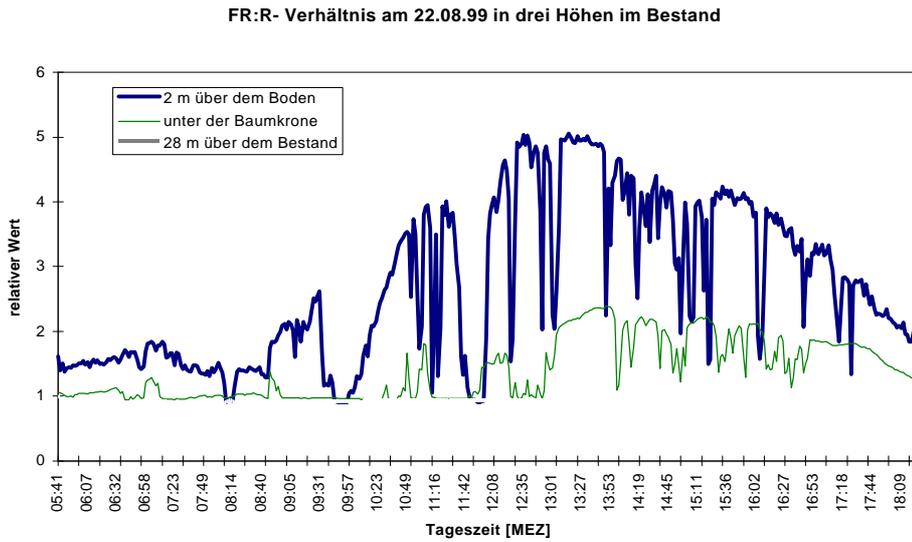


Abbildung 63: Höhenprofil des FR:R- Verhältnisses am 22.08.1999 bei wolkenlosem Himmel (CS- Tag).

An OS- Tagen (Abbildung 64) zeigt das FR:R- Verhältnis im Tagesgang kaum Variationen. Die Höhe dieser Größe ist allerdings um den Faktor 3,5 kleiner als bei CS- Tagen.

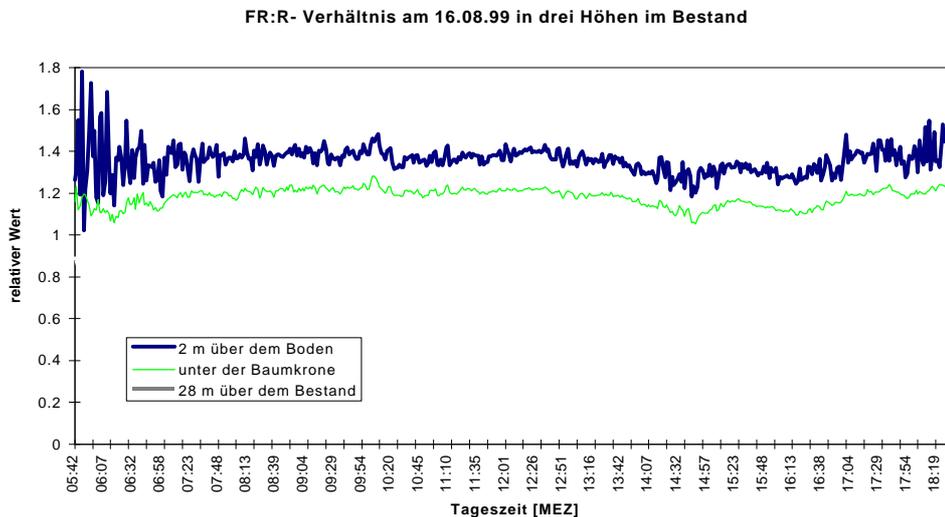


Abbildung 64: Höhenprofil des FR:R- Verhältnisses am 16.08.1999 bei stark bewölkttem Himmel (OS- Tag).

Neben den vertikalen Veränderungen im FR:R- Verhältnis treten auch horizontale Variationen unter dem Fichten- Buchen- Mischbestand auf. Diese wird in erster Linie

durch die unterschiedliche Belaubungsverteilung innerhalb des Bestandes verursacht. Abbildung 65 bis Abbildung 68 zeigen diese horizontale Variation unterhalb des Bestandes bei verschiedenen Belaubungsbedingungen. Vor dem Blattfall der Buchenblätter ist das FR:R- Verhältnis unterhalb der Buchengruppe an OS- Tagen etwa um den Faktor zwei gegenüber dem der Fichtengruppe erhöht. Für CS- Bedingungen steigt dieser Faktor auf etwa vier an (Abbildung 65 und Abbildung 66). Unter CS- Gegebenheiten zeigt sich auch eine größere Variabilität im FR:R- Verhältnis, was durch Bestandeslücken verursacht wird (Abbildung 66).

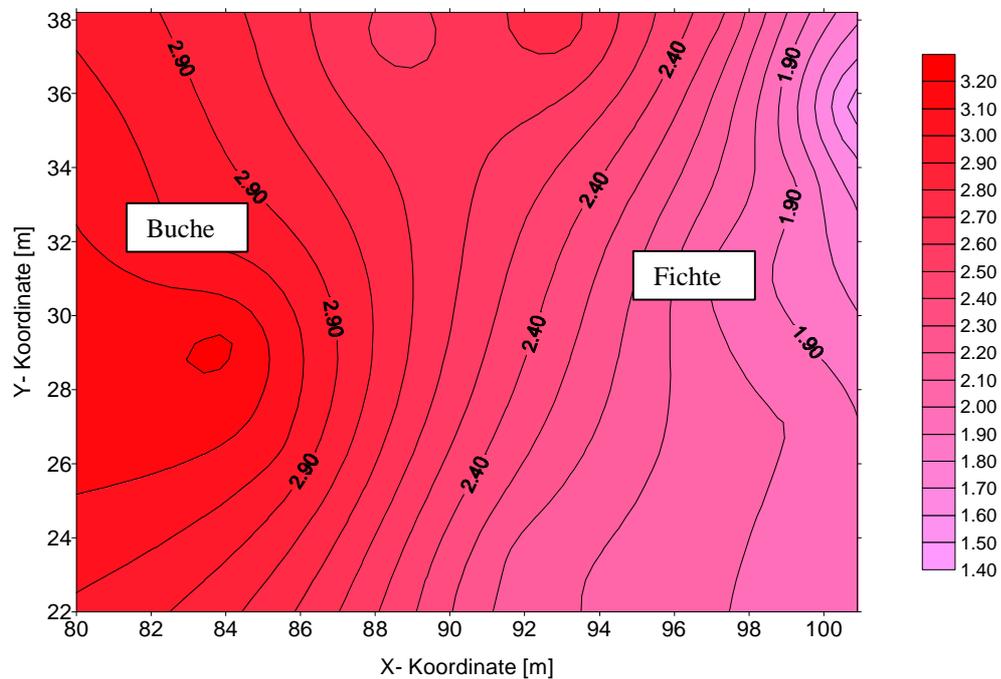


Abbildung 65: FR:R- Verteilung am Bestandesboden vor Laubfall für den 16.08.1999 bei höchstem Sonnenstand (OS- Bedingungen).

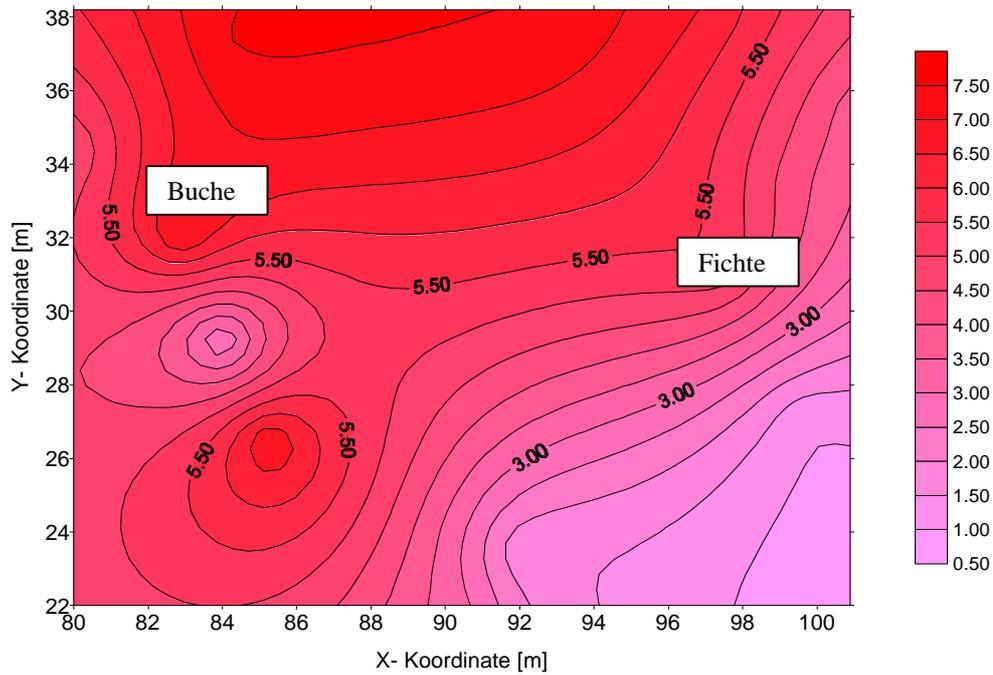


Abbildung 66: FR:R- Verteilung am Bestandesboden vor Laubfall für den 22.08.1999 bei höchstem Sonnenstand (CS- Bedingungen).

Nach dem Laubfall ist das FR:R- Verhältnis an OS- Tagen im Buchenbereich kleiner als im Fichtenbereich und erreicht sogar fast Freilandbedingungen (Abbildung 67). An CS- Tagen ist das FR:R- Verhältnis in der Buchengruppe deutlich kleiner als vor dem Laubfall und niedriger als unter dem Fichtenbestand (Abbildung 68). Allerdings werden hier die Verhältnisse im Freiland nicht erreicht. Dies kann dadurch erklärt werden, dass im weiteren Umkreis der Buchengruppe Fichten stehen, die bei der niedrigeren Sonnenhöhe im Dezember die Qualität der Sonnenstrahlung mit beeinflussen.

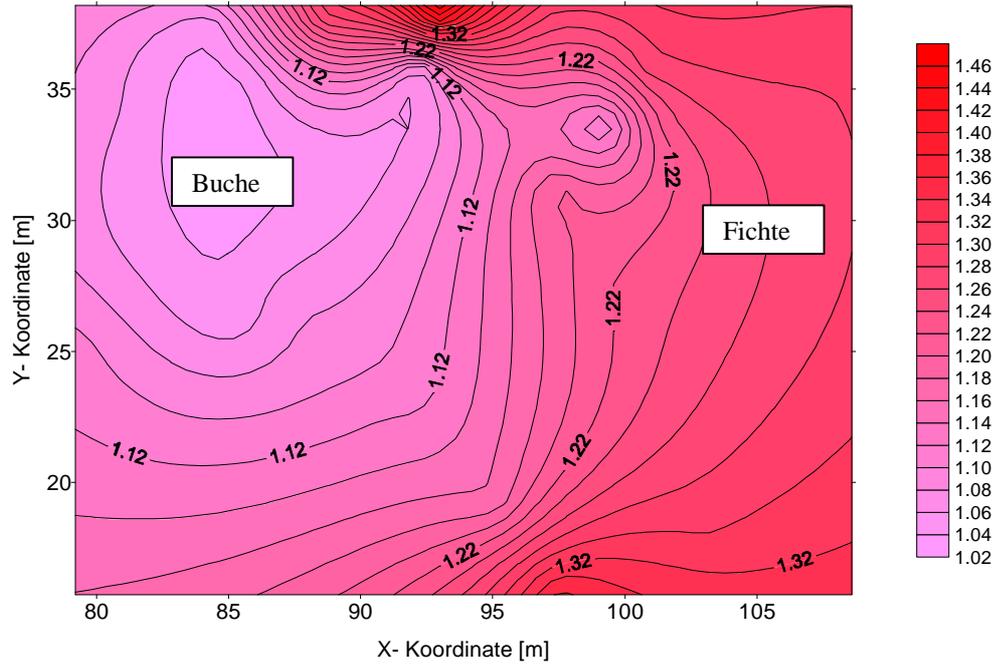


Abbildung 67: FR:R- Verteilung am Bestandesboden nach Laubfall für den 04.12. 1999 bei höchstem Sonnenstand (OS- Bedingungen).

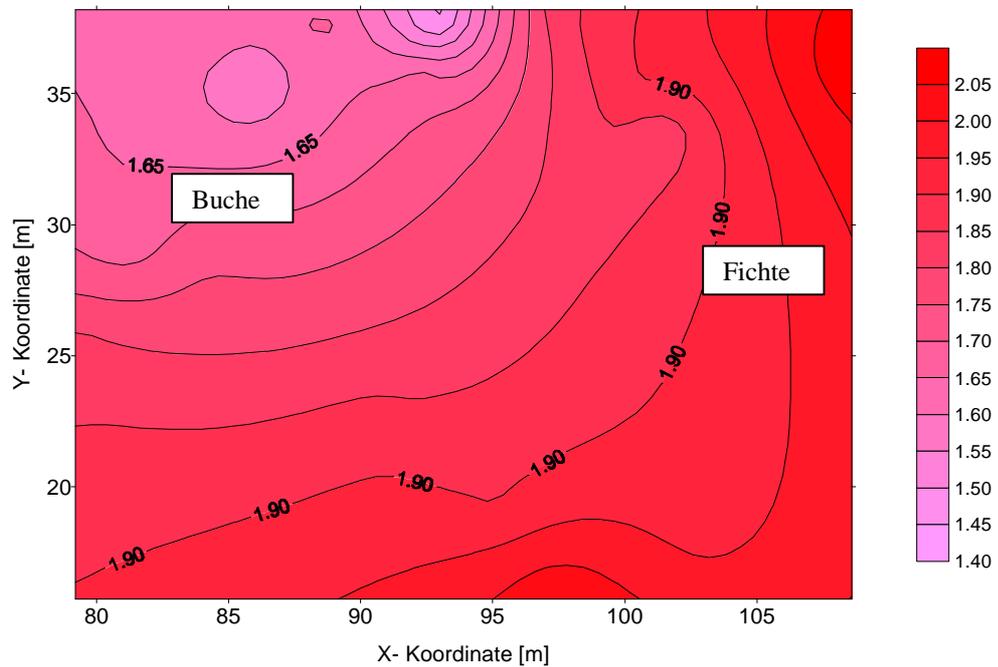


Abbildung 68: FR:R- Verteilung am Bestandesboden nach Laubfall für den 29.11. 1999 bei höchstem Sonnenstand (CS- Bedingungen).

4.3.2.3 Diskussion der spektralen Verhältnisse

Der Tagesgang der Wellenlängenbereiche Blau, Grün, Orange-Rot und NNIR bei CS-Tagen wird durch den direkten Anteil der Sonnenstrahlung und deren Rayleigh-Streuung in der Atmosphäre bestimmt. Morgens und abends ist der NNIR- und der OR-Anteil der Strahlung deutlich größer, da die Blau- und Grün- Anteile durch den längeren Weg der Strahlung durch die Atmosphäre aus der direkten Sonnenstrahlung weggestreut wurden. Dabei wird Blau stärker gestreut als Grün. An OS- Tagen überwiegt die wellenlängenunabhängige Mie- Streuung, wodurch die Farbanteile während des gesamten Tages relativ konstant bleiben. Die Anteile der einzelnen Farben gleichen sich bei CS- Tagen um die Mittagszeit denen bei OS- Tagen an.

Der erhöhte Blau- Anteil am Bestandesboden ist auf die Rayleigh- Streuung zurückzuführen, die den kurzwelligen Spektralanteil stärker streut als den langwelligen. Dadurch wird morgens und abends mehr blaues Licht in den Bestand gestreut, das den relativen Anteil von Blau an PAR erhöht.

Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Gewichtung der einzelnen Farbanteile innerhalb des PAR- Bereiches oberhalb und unterhalb des Bestandes ergaben sich Unterschiede zwischen der Fichten- und der Buchengruppe. Zeigten sich an CS- Tagen kaum Abweichungen in der relativen Verschiebung, so wurden unter OS- Bedingungen deutliche Unterschiede sichtbar. Unterhalb des Fichtenbestandes trat bei OS- Tagen im Vergleich zum Freiland eine deutliche Verschiebung zum Blau hin auf. Bei der Buchengruppe nimmt dagegen der Grün- Anteil an PAR im Vergleich zum Freiland deutlich zu. Unter OS- Bedingungen ist daher unter der Buchengruppe die Strahlung „grüner“ als über dem Bestand. Dieser Unterschied kann auf die unterschiedliche Belaubungs- und Bestandesstruktur zurückgeführt werden.

Das FR:R- Verhältnis gibt die Belaubungsstruktur des Bestandes gut wieder, was auf die spektralen Eigenschaften der Blätter und Nadeln zurückzuführen ist.

4.4 Vergleich der PAR- Messdaten mit Modellrechnungen

4.4.1 Die PAR- Verteilung in Bodennähe

An den ausgesuchten Tagen im August und September wurde jeweils für die Mittagszeit die integrale PAR- Strahlungsverteilung unterhalb des Bestandes berechnet. Die modellhafte Berechnung der winkelbezogenen Helligkeitsverteilung der Eingangsstrahlung am Freilandhimmel unterscheidet zwischen wolkenlosen und bewölkten Gegebenheiten. Diese Helligkeitsverteilung dient dem Modell als Eingangsgröße. Aus diesem Grund wurden für den Vergleich der Modellberechnungen mit den Messdaten entsprechende Tage herangezogen. Als Beispiel für die Ergebnisse wurden der 16.08.1999 (bewölkter Tag) und der 22.08.1999 (klarer Tag) ausgewählt. In Abbildung 69 und Abbildung 71 wurden die relativen Modellkoordinaten beibehalten. Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen den Vergleich der bodennahen Strahlungsverteilung für den 22.08.1999. Es zeigt sich neben der recht guten Übereinstimmung in der PAR- Verteilung auch die Vergleichbarkeit der Absolutwerte, die hier beide als Photonenflussdichte in Mikroeinstein pro Quadratmeter und Sekunde angegeben sind.

Abbildung 71 und Abbildung 72 zeigen den Vergleich der bodennahen Strahlungsverteilung für den 16.08.1999. Die PAR- Verteilung über der Bodenfläche zeigt dabei auch für diesen bedeckten Tag eine relativ gute Übereinstimmung. Die modellierte Strahlungsverteilung zeigt allerdings eine „rauere“ Oberflächenstruktur als die bei den gemessenen Werten. Die absolute photosynthetische Photonenflussdichte im Modell wird deutlich überschätzt. Diese Aussage lässt sich für alle betrachteten Tage machen.

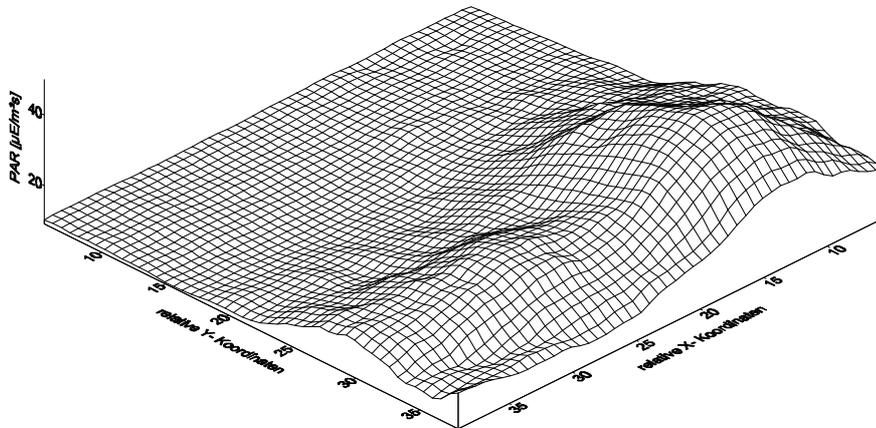


Abbildung 69: Berechnete bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 22.08.1999 (klarer Tag). Die Berechnungen wurden mit einem 3D- Strahlungstransportmodell bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.

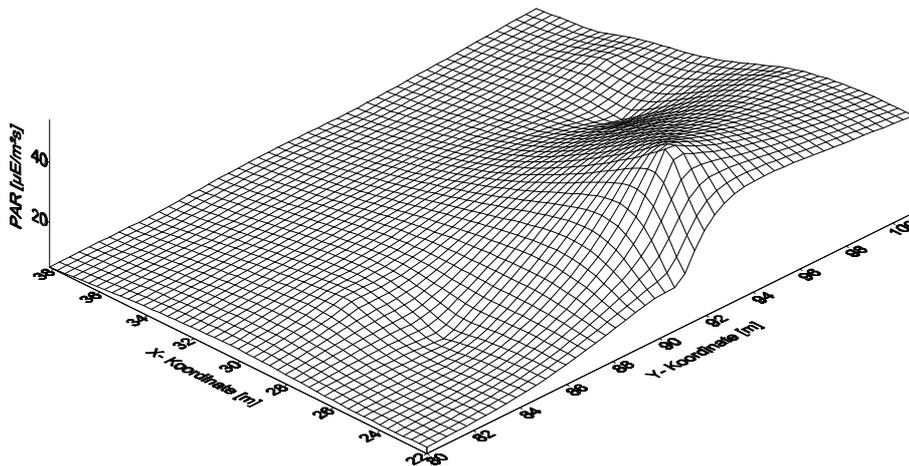


Abbildung 70: Gemessene bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 22.08.1999 (klarer Tag). Die Verteilung wurde mit dem Programm Surfer 6.0 im Kriging- Verfahren auf Basis von 15 Messsensoren bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.

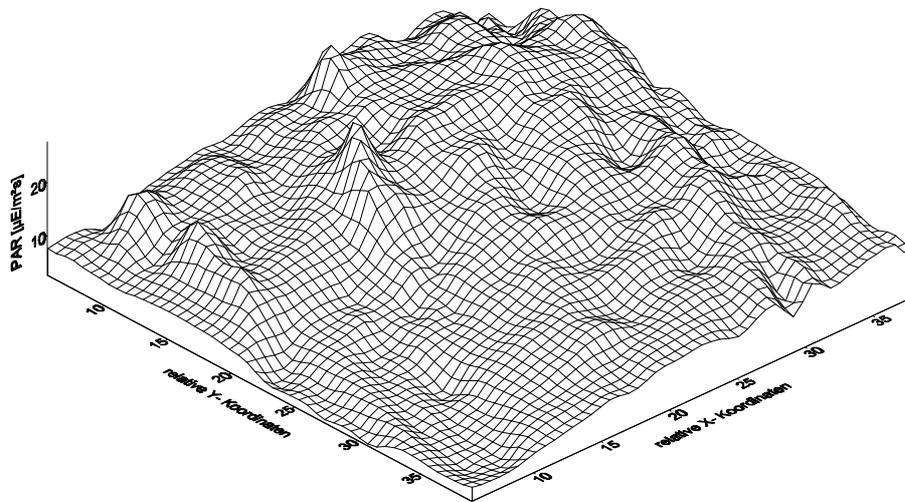


Abbildung 71: Berechnete bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonflussdichte am 16.08.1999 (bedeckter Himmel). Die Berechnungen wurden mit einem 3D- Strahlungstransportmodell bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.

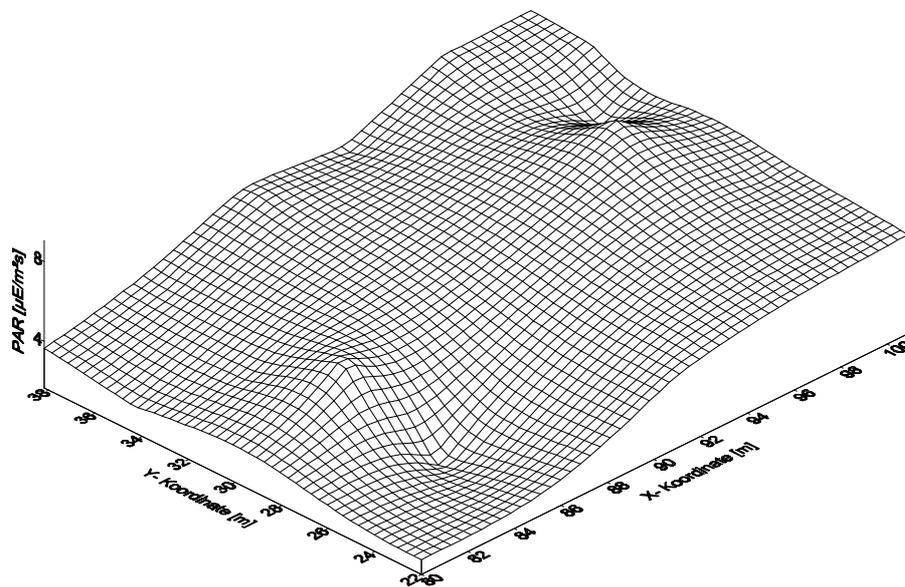


Abbildung 72: Gemessene bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonflussdichte am 16.08.1999 (bedeckter Himmel). Die Verteilung wurde mit dem Programm Surfer 6.0 im Kriging- Verfahren auf Basis von 15 Messsensoren bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.

4.4.2 Diskussion

Beim Vergleich der modellierten mit den gemessenen Flussdichten hat sich gezeigt, dass bei unbewölkten Tagen die Modellwerte sowohl im Verlauf als auch in den absoluten Werten besser mit den gemessenen übereinstimmen als bei bedeckten Tagen.

Ein ähnliches Ergebnis erzielte auch *Mießten (1994)*. Die Überhöhung in der Photonenflussdichte an bedeckten Tagen ist vermutlich auf die relativ offenen Randbedingungen im modellierten Versuchsbestand zurückzuführen. Diese werden einmal durch den hohen mittleren Kronenansatzpunkt von etwa 9 bis 10 m und andererseits durch die relativ großen Bestandeslücken um die Versuchsfläche verursacht. Aus diesen Gründen kann die diffuse Strahlung, die bei bedeckten Tagen (fast) ausschließlich vorhanden ist, besser in den Bestand eindringen.

Die Vernachlässigung der Mehrfachstreuung, die sich auch bei den wolkenlosen Tagen auswirkt, scheint keinen allzu großen Einfluss auf die Ergebnisse zu haben.

5 Ausblick

Die Messungen am Standort Kranzberger Forst werden mit zusätzlichen Sensoren zur Bestimmung der kleinräumigen Strahlungsverteilung an Zweigen und Ästen innerhalb der Versuchsfläche im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 607 („Wachstum oder Parasitenabwehr“) weiter fortgeführt. Dazu wurden 200 Messsensoren aus Kunststoffmaterial kalibriert und im Bestand verteilt.

Zur weiteren Untersuchung der spektralen Verhältnisse innerhalb des Versuchsbestandes sollten möglichst Glasfasersensoren eingesetzt werden, um eine gute Mess- und Wellenlängenempfindlichkeit zu erreichen.

Folgende Punkte könnten in Zukunft behandelt werden:

- Das Alterungsverhalten der Messsensoren im Freilandeinsatz und die dadurch bedingten Kalibrier- und Ersetzungszyklen.
- Nähere Untersuchung des FR:R- Verhältnisses und dessen Beziehung zum LAI.

- Bestimmung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Fichtennadeln und Buchenblätter im untersuchten Bestand als Eingangsdaten für die Modellierung.
- Weitere Anpassung des verwendeten Strahlungstransportmodells auf die Gegebenheiten eines Fichten- Buchen- Mischbestandes sowie Behandlung der Randbedingungen an Lichtungen.
- Anpassung des Modells zur Ausgabe spektraler Informationen, um diese mit den Messergebnissen vergleichen zu können.

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messgrößen für die einfallende Strahlung, bezogen auf die bestrahlte Fläche A_E und die Zeit t der Lichteinwirkung (Fritschen und Gay, 1979; Gerthsen et al., 1989; Kuchling, 1989).....	11
Tabelle 2: Auswirkung von Strahlung auf das pflanzliche Leben (aus Ross, J., 1981).....	18
Tabelle 3: Die Spezifikationen des Multi- Channel- Spektrometer- Moduls MCS UV-NIR (Carl Zeiss Produktinformation).....	34
Tabelle 4: Eigenschaften der beiden verwendeten Lichtwellenleitertypen PWF (Quarzglas) und POF (Kunststoff).....	43
Tabelle 5: Abhängigkeit des Faktors t von der statistischen Sicherheit P und der Anzahl der Messungen n für die Berechnung des Vertrauensbereiches des Mittelwertes (Kuchling, 1989).	54
Tabelle 6: Beispiel für den Aufbau der Positionstabelle für die Zuordnung der X/Y- Koordinaten zu eindeutigen Positionsnummern.	57
Tabelle 7: Beispiel für eine bereits geordnete Programm- und Zyklustabelle. Mit diesen Tabellen wird der Messablauf programmiert.	59
Tabelle 8: Beispiel für eine Messorttabelle, in der die Koordinaten der im Bestand verteilten Sensoren mit der Sensornummer verknüpft sind.	60
Tabelle 9: Datenstruktur eines Messspektrums mit den abgespeicherten Zusatzinformationen.....	62
Tabelle 10: Aufbau der Verzeichnis- und Dateinamen aus dem Messdatum und der Messzeit.	63
Tabelle 11: Beispiel für die Dateinamenskennung bei der Kalibrierung eines Sensors mit Vergleichssensoren.....	65
Tabelle 12: Zusammenstellung der näher betrachteten Tage bei klarem Himmel (CS) und bei stark bewölkten Verhältnissen (OS) 1999.	80

7 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Spektrale Verteilung der Sonneneinstrahlung in verschiedenen Höhen über Normalnull; gemessen an einer senkrecht zur Sonneneinstrahlung stehenden Fläche als Funktion der Wellenlänge (nach: Gates, 1980).....7
- Abbildung 2: relative spektrale Empfindlichkeit verschiedener Detektorarten; a) photometrische Empfindlichkeit (Auge des Menschen), b) konstante Energieempfindlichkeit, c) konstante Photonenempfindlichkeit; (nach Hartmann, 1978; Dohrenbusch, 1995)..... 12
- Abbildung 3: spektrale Wirkungsfunktion der Photosynthese in relativen Einheiten nach DIN 5031, Teil 10. 12
- Abbildung 4: Umrechnungsfunktion zwischen der Bestrahlungsstärke in W/m² und dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges in lm/m² (Lumen pro Quadratmeter)..... 14
- Abbildung 5: Absorptionsspektren von Chloroplastenpigmenten in Lösung. In grünen Pflanzen findet man eine Mischung verschiedener Chlorophylle und Carotinoide; [nach Zscheile: Bot. Gaz. **102**, 463 (1941) und Plant Pysiol. **17**, 331 (1942); O'h Eochoa, in: Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments (Goodwin, Ed.), 407 Academic Press, London, New York 1966; aus Renger, 1978]..... 15
- Abbildung 6: Spektrale Eigenschaften eines Baumwollblattes (obere Blattfläche) als Funktion der Wellenlänge: a) Absorption, b) Reflektionsvermögen, c) Transmissionsvermögen (nach Gates, 1980)..... 17
- Abbildung 7: Nachweis für das reversible Hellrot- Dunkelrot-Photoreaktionssystem in „normal“ im Licht herangewachsenen grünen Bohnenpflanzen. Alle Pflanzen erhielten eine Hauptlichtperiode von 8 Std. Fluoreszenz- Weißlicht pro Tag. Links: kein Zusatzlicht. Mitte: 4 min. dunkelrot pro Tag unmittelbar nach dem Ende der Hauptlichtperiode. Rechts: 4 min. dunkelrot + 4 min. hellrot pro Tag unmittelbar nach dem Ende der Hauptlichtperiode (nach Hendricks (1964), aus Mohr, 1969)..... 18
- Abbildung 8: Einjährige Douglasie aus unterschiedlichen Photoperioden. Links: 12-stündiger Kurztag. Mitte: 12-stündiger Kurztag mit 1-

stündiger Störlichtperiode in Nachtmitte. Rechts: 20-stündiger Langtag (nach Downs (1962), aus Mohr, 1969).....	19
Abbildung 9: Bild über Aufbau von Monomodens- (a) und Multimodens- LWL (b); (Kersten, 1984).....	21
Abbildung 10: Stufen und Gradientenindex: Brechungsverlauf für einen LWL mit Stufenindex (a) und einem LWL mit Gradientenindex (b); (Rosenberger, 1977).	22
Abbildung 11: Lokaler, über die Z- Achse summierter Blattflächenindex der modellierten Versuchsfläche. Die x- Achse bildet mit der Nordrichtung einen Winkel von ca. 100°. Der Koordinatenursprung liegt im Nullpunkt der Parzelle 1 der Wuchsreihe FRE 813 (Kahn und Schütze, 1997)(nach Grote, 2000).....	29
Abbildung 12: Mittlere Reflektions- und Transmissionskoeffizienten für Fichtenzweige und Buchenblätter (aus: Tanner und Eller 1985; Miessen, 1994).....	30
Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Multi- Channel- Spektrometermoduls.....	33
Abbildung 14: Faseradapter zur optimalen Lichteinkopplung in das MCS- Modul.	34
Abbildung 15: Schemazeichnung einer Hamamatsu- Diodenzeile, wie sie im MCS UV-NIR- Modul eingesetzt wird.	35
Abbildung 16: Schema der Positionierungsachsen mit Linearmotoren.	37
Abbildung 17: Anschlussplan des digifas ® 7201; digitaler Servoregler zur Ansteuerung von Synchron-Servomotoren der Baugruppe 6SM (Montageanleitung, Seidel Antriebs-Systeme).	38
Abbildung 18: Verdrahtung der digitalen Servoregler gemäß Anschlussplan (Foto: Reitmayer Karin).	39
Abbildung 19: Spektrale Dämpfungscharakteristik der beiden Lichtwellenleitertypen PWF (Glasfaser) und POF (Kunststofffaser).	42
Abbildung 20: Abhängigkeit des Lichtsignals von der Einstrahlungsrichtung, dargestellt für die verwendeten Lichtwellenleiterarten; bei 0° ist der LWL in die Kugel eingeklebt, bei 180° wird in gedachter Linie direkt in den LWL eingestrahlt.	44
Abbildung 21: Schemazeichnung der Sensorbefestigungen sowohl im Bestand als auch an der Haltevorrichtung.	45

Abbildung 22: Messsignal eines Referenzsensors mit den Integrationszeiten von 1 s und 50 ms sowie Signal nach Dunkel- und Offset-Korrektur.	47
Abbildung 23: Darstellung der spektralen Eigenschaften eines Normsensors bei der Messung der Tungsten- Normlampe (Integrationszeit 1 Sekunde).	48
Abbildung 24: Schema der Relativ- und Bestrahlungsstärkekalibrierung eines Messsensors mit einem Vergleichssensor.	49
Abbildung 25: Spektraler Verlauf der raumwinkelbezogenen Bestrahlungsstärke $I_{\lambda A}$ der verwendeten Tungsten- Standardlampe No. 496 in $\mu\text{W}/(\text{nm sr})$, aufgetragen nach der Wellenlänge.	52
Abbildung 26: Graphische Messoberfläche mit Erläuterungen.	61
Abbildung 27: Messprogrammansicht für die Messung der Sensoren bei der Kalibrierung.	64
Abbildung 28: Kalibrierprogramm zur Errechnung der Kalibrierfaktoren und deren Standardabweichung sowie weiterer Korrekturdateien für die spätere Auswertung.	66
Abbildung 29: Auswertungsprogramm zur Berechnung der Integralwerte sowohl in Watt pro Quadratmeter als auch in Mikroeinstein und Lux pro Qadratmeter.	66
Abbildung 30: Lagebeschreibung der Parzelle 1 der Wuchsreihe Freising FRE 813 (Kahn und Schütze, 1997); die Anordnung der Türme ist nicht maßstäblich.	68
Abbildung 31: Foto der Versuchsfläche unterhalb der noch nicht belaubten Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche (Foto: Reitmayer Heinrich).	68
Abbildung 32: Die Versuchsfläche als Teil von Parzelle 1 der Wuchsreihe Freising FRE 813. Der Koordinatenursprung liegt am südwestlichen Teil der Parzelle und bildet eine Grundlage bei der waldwachstumskundlichen Erhebung des Standortes (die Daten der Versuchsfläche wurden von der Waldwachstumskunde der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt).	69
Abbildung 33: Position des Messwagens innerhalb eines Fichten- Buchen- Mischbestandes; die gesamte Messapparatur ist in diesem verdunkelten Messanhänger eingebaut (Foto: Reitmayer Karin).	70
Abbildung 34: Lichtwellenleiter- Befestigung an der Haltevorrichtung innerhalb des Messwagens (Foto: Reitmayer Karin).	70
Abbildung 35: Beispiel für eine Befestigung des Lichtwellenleiters an einem Edelstahlseil im Bestand (Foto: Reitmayer Karin).	71

Abbildung 36: Schemazeichnung der räumlichen Verteilung der Glasfaser-Sensoren innerhalb der Versuchsfläche. Die Bodensensoren sind in einer Höhe von 2 m über dem Boden befestigt. Höhenprofile sind an den Türmen 1,3 und 4 angebracht.....	72
Abbildung 37: Darstellung des wellenlängenabhängigen Verhältnisses zwischen den Kalibrierfaktoren eines Kunststoff- und eines Glasfaser- Lichtwellenleiters im PAR- Spektralbereich..	73
Abbildung 38: Kalibrierfaktoren mit Fehlerangaben (zufälliger Fehler) bei den zwei verwendeten Sensortypen; PMMA- Sensor mit 37 m Länge und Glasfaser- LWL mit 30 m Länge.	74
Abbildung 39: Darstellung der wellenlängenabhängigen unteren Detektionsgrenze der beiden entwickelten Sensortypen (Kunststoff- und Glasfaser- LWL).....	75
Abbildung 40: Nachweisgrenze mit Fehlerangaben für die verschiedenen Sensoren, integriert über dem PAR- Spektralbereich.	76
Abbildung 41: Globalstrahlung und diffuse Strahlung bei CS (Clear Sky)-Bedingungen der betrachteten Tage.....	79
Abbildung 42: Globalstrahlung und diffuse Strahlung bei OS (Overcast Sky)-Bedingungen der betrachteten Tage.....	79
Abbildung 43: Tagesgänge der integralen Anteile von PAR und NNIR an klaren (CS) Tagen im untersuchten Zeitraum von August bis Dezember 1999.	81
Abbildung 44: Tagesgänge der integralen Anteile von PAR und NNIR an stark bewölkten (OS) Tagen im untersuchten Zeitraum von August bis Dezember 1999.	82
Abbildung 45: Tagesgang von PAR unterhalb des Bestandes für jeweils einen Sensor an zwei Tagen im August und Oktober (sowohl bei CS- als auch bei OS- Bedingungen).....	83
Abbildung 46: Die integrale PAR- Verteilung unter dem Versuchsbestand am 22.08.1999 (CS) bei höchstem Sonnenstand.	84
Abbildung 47: Die integrale PAR- Verteilung unter dem Versuchsbestand am 16.08.1999 (OS) bei höchstem Sonnenstand.	85
Abbildung 48: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei wolkenlosem Himmel am 13.09.1999.	87
Abbildung 49: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei wolkenlosem Himmel am 17.10.1999.	88

Abbildung 50: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei bewölktem Himmel am 16.08.1999.....	88
Abbildung 51: Relativer Anteil der einzelnen Farben an dem Gesamtspektrum zwischen 400 nm und 850 nm über dem Bestand bei bewölktem Himmel am 04.12.1999.....	89
Abbildung 52: Tagesgang des berechneten Verhältnisses von FR (720 nm bis 740 nm) zu R (670 nm bis 690 nm) am Beispiel eines CS- und eines OS- Tages.	89
Abbildung 53: Relative spektrale Verteilung über und unter dem Waldbestand vor und nach Laubfall.	90
Abbildung 54: Vergleich des relativen Strahlungsanteils eines Sensors in Bodennähe zu dem Signal eines über dem Bestand angebrachten Sensors (sowohl vor als auch nach Blattfall).....	91
Abbildung 55: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).....	92
Abbildung 56: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).....	93
Abbildung 57: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).	94
Abbildung 58: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche an einem klaren Tag (CS).	94
Abbildung 59: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).	95
Abbildung 60: Prozentualer Anteil des blauen, grünen und orange-roten Strahlungsbereiches an der PAR unter einer Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).	95
Abbildung 61: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer Fichtengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (CS).....	96
Abbildung 62: Prozentuale Verschiebung des blauen, grünen und orange-roten Spektralanteiles im Vergleich zum Freiland unter einer	

Buchengruppe innerhalb der Versuchsfläche bei bedecktem Himmel (OS).....	97
Abbildung 63: Höhenprofil des FR:R- Verhältnisses am 22.08.1999 bei wolkenlosem Himmel (CS- Tag).....	98
Abbildung 64: Höhenprofil des FR:R- Verhältnisses am 16.08.1999 bei stark bewölktem Himmel (OS- Tag).....	98
Abbildung 65: FR:R- Verteilung am Bestandesboden vor Laubfall für den 16.08.1999 bei höchstem Sonnenstand (OS- Bedingungen).....	99
Abbildung 66: FR:R- Verteilung am Bestandesboden vor Laubfall für den 22.08.1999 bei höchstem Sonnenstand (CS- Bedingungen).....	100
Abbildung 67: FR:R- Verteilung am Bestandesboden nach Laubfall für den 04.12. 1999 bei höchstem Sonnenstand (OS- Bedingungen).....	101
Abbildung 68: FR:R- Verteilung am Bestandesboden nach Laubfall für den 29.11. 1999 bei höchstem Sonnenstand (CS- Bedingungen).....	101
Abbildung 69: Berechnete bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 22.08.1999 (klarer Tag). Die Berechnungen wurden mit einem 3D- Strahlungstransportmodell bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.....	104
Abbildung 70: Gemessene bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 22.08.1999 (klarer Tag). Die Verteilung wurde mit dem Programm Surfer 6.0 im Kriging- Verfahren auf Basis von 15 Messsensoren bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.....	104
Abbildung 71: Berechnete bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 16.08.1999 (bedeckter Himmel). Die Berechnungen wurden mit einem 3D- Strahlungstransportmodell bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.....	105
Abbildung 72: Gemessene bodennahe Verteilung der photosynthetischen Photonenflussdichte am 16.08.1999 (bedeckter Himmel). Die Verteilung wurde mit dem Programm Surfer 6.0 im Kriging- Verfahren auf Basis von 15 Messsensoren bei höchstem Sonnenstand durchgeführt.....	105

8 Literaturverzeichnis

- Aaslyng J. M., Rosenqvist E., Høgh-Schmidt K. (1999): A sensor for microclimatic measurement of photosynthetically active radiation in a plant canopy. *Agric. For. Meteorol.* 96, S.189-197.
- Alados I., Alados-Arboledas L., Foyo-Moreno I. (1996): Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. For. Meteorol.* 78, S. 121-131.
- Anderson M. C. (1969): A comparison of two theories of scattering of radiation in crops. *Agric. Meteorol.* 6: S.399-405.
- Anderson M. C. (1970): Interpreting the fraction of solar radiation available in forest. *Agric. Meteorol.* 7: S.19-28.
- Anderson M. C. (1981): The geometry of leaf distribution in some south-eastern Australian forests. *Agric. Meteorol.* 25: S.195-206.
- Anisimov O., Fukshansky L. (1997): Optics of vegetation: implications for the radiation balance and photosynthetic performance. *Agric. For. Meteorol.* 85: S.33-49. 8.
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E. T., Hatfield J. L. (1984): Estimating absorbed photosynthetically active radiation and leaf area index from spectral reflectance of wheat. *Agron. J.* 76, S.300-306.
- Ashton P. M. S. (1992): Some measurements of the microclimate within a Sri Lankan tropical rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 59: S.217-235.
- Baldocchi D., Hutchison B., Matt D., McMillen R. (1984b). Seasonal variations in the radiation regime within an oak-hickory forest. *Agric. For. Meteorol.* 33: S.177-191.
- Baldocchi D., Hutchison B., Matt D., McMillen R. (1986). Seasonal variation in the statistics of photosynthetically active radiation penetration in an oak-hickory forest. *Agric. For. Meteorol.* 36: S.343-361.
- Baumgartner A. (1955): Licht und Naturverjüngung am Nordrand eines Waldbestandes. *Fw. Cbl.* 74: S.59-64.
- Baumgartner A. (1960): Gelände und Sonnenstrahlung als Standortfaktor am Gr. Falkenstein (Bayerischer Wald). *Forstw. Cbl.* 79, S. 286-297.
- Becker P., Erhart D. W., Smith A. P. (1989): Analysis of forest light environments Part I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical canopy photographs. *Agric. For. Met.* 44, S.217-232.

- Becker P., Weingarten D. S. (1991): A comparison of several models for separating direct and diffuse components of solar irradiation. *Agric. For. Meteorol.* 53, S. 347-353.
- Bégué A, Hanan N. P., Prince S. D. (1994): Radiative transfer in shrub savana sites in Niger - preliminary results from HAPEX-II-Sahel II. PAR interception of the woody layer. *Agric. For. Meteorol.* 69, S.247-266.
- Borthwick H. A., Hendricks S. B. (1961): Effects of radiation on growth and development. In: *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, hg. von Ruhland W., in Gemeinschaft mit Ashby E., Bonner J., Geiger-Huber M., James W. O., Lang A., Müller D., Stålfelt, M. G. Band XVI: Außenfaktoren in Wachstum und Entwicklung, redigiert von Melchers G., Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, S. 299-330.
- Brechtel H. M. (1962): Methodische Beiträge zur Ökologie der Überschirmung und Auflichtung einschichtiger Waldbestände. *Schriftreihe d. Landesforstverw. Bad.-Württ.* 14. 94 S.
- Bristow K. L., Campbell G. S., Saxton K. E. (1985): An equation for separating daily solar irradiation into direct and diffuse components. *Agric. For. Meteorol.* 35, S.123-131.
- Britton C. M., Dodd J. D. (1976): Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Agric. Meteorol.* 17, S.1-7.
- Brown Jr. P. S., Pandolfo J. P. (1969): An equivalent-obstacle model for the computation of radiative flux in obstructed layers. *Agric. Meteorol.* 6: S.407-421.
- Brunner A. (1993): Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen und eine Methodenstudie zur ökologischen Lichtmessung im Wald. *Forstliche Forschungsberichte München Nr. 128. Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Ludwig-Maximilians-Universität München.*
- Brunner A. (1994): Ökologische Lichtmessung im Wald. *Forstarchiv* 65, S. 133-138.
- Brunner A (1998): A light model for spatially explicit forest stand models. *For. Ecol. Manage.* 107: S.19-46.
- Byrne G. F. (1966): A simple way of improving the angular response of solid-state photodetectors. *Agric. Meteorol.* 3: S.367-368.
- Campbell G. S. (1986): Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.* 36: S.317-321.
- Cascatti A. (1997a): Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecol. Modelling* 101, S.263-274.

- Cascatti A. (1997b): Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. II. Mosel testing and application in a Norway spruce stand. *Ecol. Modelling* 101, S.275-284.
- Chazdon R. L., Field C. B. (1987): Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73, S.525-532.
- Chen J. M., Black T. A. (1991): Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agric. For. Met.* 57: S.1-12.
- Cieslar A. (1904): Einiges über die Rolle des Lichtes im Walde. *Mitt. Forstl. Versuchswesen Österreich* 30.
- Clearwater M. J., Nifinluri T., van Gardingen P. R. (1999): Forest fire smoke and a test of hemispherical photography for predicting understorey light in Bornean tropical rain forest. *Agric. For. Meteorol.* 97, S.129-139.
- Daughtry C. S. T., Ranson K. J., Biehl L. L. (1989): A new technique to measure the spectral properties of conifer needles. *Remote Sens. Environ.* 27: S.81-91.
- Daughtry C. S. T., Gallo, R. P., Goward S. N., Prince S. D., Kustas N. P. (1992): Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 39, S.141-152.
- de Castro F., Fetcher N. (1998): Three dimensional model of the interception of light by a canopy. *Agric. For. Meteorol.* 90: S.215-233.
- Deutsches Institut für Normung: DIN 5031, Teil 10 (1979): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Größen und Formelzeichen für physiologisch wirksame Strahlung. Beuth, Berlin-Köln.
- De Wit C. T., (1965) :Photosynthesis of leaf canopy. *Agric. Res. Rep.*, 663: S.1-57.
- Dirmhirn I. (1964): Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt/Main.
- Dohrenbusch A. (1989): Die Anwendung fotografischer Verfahren zur Erfassung des Kronenschlussgrades. *Forstarchiv* 60: S.151-155.
- Dohrenbusch A. (1995): Überlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessung im Wald. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 6, S.109-114.
- Dohrenbusch A., Kranigk J., Pryor D. (1995): Entwicklung und Bau eines Lichtmeßgerätes zur Erfassung der photosynthetisch nutzbaren Strahlung. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 8, S.154-160.
- Duncan W. G., Loomis R. S., Williams W. A., Hanan R. (1967): A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 38: S.181-205.

- Eber W. (1972): Über das Lichtklima von Wäldern bei Göttingen und seinen Einfluss auf die Bodenvegetation. *Scripta Geobotanica* 3.
- Ehrhardt O., Eimern J. van, (1983): Der Strahlungshaushalt eines Buchenwaldes an fünf ausgewählten Strahlungstagen. *Wetter und Leben* 35, S. 230-234.
- Eimern J. van, Ehrhardt O. (1985): Zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Strahlung und Temperatur an der Boden- und Kronenoberfläche eines Buchenwaldes. *Forstarchiv* 56, S. 181-186.
- Eller B. M., Glätti R., Flach B. (1981): Optische Eigenschaften und Pigmente von Sonnen- und Schattenblättern der Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) und der Blutbuche (*Fagus silvatica* cv. *Atropunicea*). *Flora* 171: S.170-185.
- Evans G. C., Coombe D. E. (1959): Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J. Ecol.* 47, S.103-113.
- Fabian P. (1984): *Atmosphäre und Umwelt. Chemische Prozesse - Menschliche Eingriffe.* Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Federer C. A. (1971): Solar radiation absorption by leafless hardwood forests. *Agric. Meteorol.* 9: S.3-20.
- Flemming G. (1962): Strahlung und Wind an Bestandesrändern. *Arch. f. Forstw.* 11: S.647-656.
- Flemming G. (1964): Das Klima an Waldbestandsrändern. *Abh. met. hydrol. Dienst DDR*, Nr. 71. Berlin: Akademie-Vlg.
- Fritschen L. J., Gay L. W. (1979): *Environmental instrumentation.* Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin, S. 93-118.
- Fritz S. (1958): Transmission of solar energy through the earth's clear and cloudy atmosphere. *Trans. Conf. Use Solar Energy: The Scientific Basis*, E. F. Carpenter (Ed.), Univ Ariz. Press, Tucson, Ariz. 1, S. 17-36.
- Gallo K. P., Daughtry C. S. T., Bauer M. E. (1985): Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote. Sens. Environ.* 17, S.221-232.
- Galoux A., Benecke P., Gietl G., Hager H., Kayser C., Kiese O., Knoerr K. R., Murphy C. E., Schnock G., Sinclair T. R. (1981): Radiation, heat, water and carbon dioxide balances. In: *Dynamic properties of forest ecosystems*, hg. von Reichle E. D., IBP (International Biological Programme) 23, Cambridge University Press Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, S. 87-204.
- Gates, D. M. (1980): *Biophysical ecology.* Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin.

- Gatherum G. E. (1961): Variation in measurements of light intensity under forest canopies. *For. Sci.* 7: S.144-145.
- Geittner P. (1988): Lichtleitfasern für die optische Nachrichtenübertragung. *Physikalische Leitungsmechanismen, moderne Lichtleitfaserstrukturen und Verfahren zu deren Herstellung.* *Physik in unserer Zeit* 2, S. 37-47.
- Gendron F., Messier C., Comeau P. G. (1998): Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests. *Agric. For. Meteorol.* 92: S.55-70.
- Gerthsen C., Kneser H. O., Vogel H. (1989): *Physik. Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen.* 16. Aufl., bearbeitet von Vogel H., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong.
- Goudriaan J. (1988): The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agric. For. Meteorol.* 43, S.155-169.
- Grace J. C., Jarvis P. G., Norman J. M. (1987): Modelling interception of solar radiant energy in intensively managed stands. *New Zealand, J. For. Sci.* 17: S.193-209.
- Grant R. H. (1985): The influence of the sky radiance distribution on the flux density in the shadow of a tree crown. *Agric. For. Meteorol.* 35: S.59-70.
- Grant R. H., Jenks M. A., Rich P. J., Peters P. J., Ashworth E. N. (1995): Scattering of ultraviolet and photosynthetically active radiation by sorghum bicolor: influence of epicuticular wax. *Agric. For. Meteorol.* 75, S. 263-281.
- Grant R. H., Heisler G. M., Gao W. (1996): Photosynthetically-active radiation: sky radiance distributions under clear and overcast conditions. *Agric. For. Meteorol.* 82: S.267-292.
- Green S. R., McNaughton K. G., Greer D. H., Mc Leod D. J. (1995): Measurement of the increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. *Agric. For. Meteorol.* 76, S. 163-183.
- Grote R (2000): unveröffentlichte Daten; SFB 607 'Wachstum oder Parasitenabwehr' Teilprojekt C 3.
- Gueymard C. (1989): An atmospheric transmittance model for the calculation of the clear sky beam, diffuse and global photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 45, S.215-229.
- Gutschick V. P., Barron M. H., Waechter D. A., Wolf M. A. (1985): Portable monitor for solar radiation that accumulates irradiance histograms for 32 leaf-mounted sensors. *Agric. For. Meteorol.* 33: S.281-290.
- Häckel H. (1993): *Meteorologie. Uni- Taschenbücher 1338, 3. verb. Auflage.*

- Hanan N. P., Bégué A. (1995): A method to estimate instantaneous and daily intercepted photosynthetically active radiation using a hemispherical sensor. *Agric. For. Meteorol.* 74, S. 155-168.
- Hanan N. P., Prince S. D., Bégué A. (1995): Estimation of absorbed photosynthetically active radiation and vegetation net production efficiency using satellite data. *Agric. For. Met.* 76: S.259-276.
- Hartig T. (1877): Photometrisches. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 53, S. 35-36.
- Hartmann K. M. (1978): Aktionsspektrometrie. In: *Biophysik. Ein Lehrbuch*, hg. von Hoppe W., Lohmann W., Markl H., Ziegler H., korrigierter Nachdruck der ersten Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, S. 197-222.
- Hartmann K. M., Haupt W. (1978): Photomorphogenese. In: *Biophysik. Ein Lehrbuch*, hg. von Hoppe W., Lohmann W., Markl H., Ziegler H., korrigierter Nachdruck der ersten Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, S. 449-468.
- Hassika P., Berbigier P. (1998): Annual cycle of photosynthetically active radiation in maritime pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 90:S.157-171.
- Hipps L. E., Asrar G., Kanemasu E. T. (1983): Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. *Agric. Meteorol.* 28: S.253-259.
- Holmes M. G., Smith H. (1977): The function of phytochrome in the natural environment. I. Characterisation of the daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. IV. Light quality and plant development. *Photochem. And Photobiol.* 25: S. 533-538(I), S.551-557(IV).
- Howell T. A., Meek D. W., Hartfield J. L. (1983): Relationship of photosynthetically active radiation to shortwave radiation in the San Joaquin Valley. *Agric. Meteorol.* 28, S. 157-175.
- Hutchinson B. A., Matt D. R. (1976): Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.* 17: S.93-110.
- Hutchinson B. A., Matt D. R. (1977): The annual cycle of solar radiation in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.* 18: S.255-265.
- Hutchinson B. A., Matt D. R., McMillen R. T. (1980): Effect of sky brightness distribution upon penetration of diffuse radiation through canopy gaps in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.* 22: S.137-147.
- Idso S. B., de Wit C. T. (1970): Light relations in plant canopies. *Appl. Opt.* 9, S.177-184.

- Kahn M., Schütze G. (1997): Exkursionsführer MWW-EF 99, hg. vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Forstwissenschaftliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Karalis J. D. (1989): Characteristics of direct photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 49, S. 225-234.
- Kern K. G. (1966): Wachstum und Umweltfaktoren im Schlag- und Plenterwald. *Schriftenr. Forstl. Abt. Univ. Freiburg.* Bd. 5.
- Kimes D. S., Sellers P. J., Newcomp W. W. (1987): Hemispherical reflectance variations of vegetation canopies and implications for global and regional energy budget studies. *J. Clim. App. Meteorol.* 26: S.959-972.
- Kimes D. S. (1991): Radiative transfer in homogeneous and heterogenous vegetation canopies, In: R. B. Myneni and J. Ross (Editors), *Photon- Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical remote Sensing.* Springer-Verlag, Berlin, S.339-388.
- Kimball H. H., Hand I. F. (1921): Sky brightness and daylight illumination measurements, *Amer. Illumination Eng. Soc. Trans.* 16, S. 235-275.
- Knyazikhin Yu. V., Marshak A. (1991): Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies and iterative methods for their solution, In: R. B. Myneni and J. Ross (Editors), *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing.* Springer-Verlag, Berlin, S.9-43.
- Knyazikhin Yu., Marshak A., Schulze D., Myneni R., Gravenhorst G. (1994): Optimization of solar radiation input in forest canopy as a tool for planting/cutting of trees, *Transport Theory and Statist. Phys.* 23(5): S.671-700.
- Knyazikhin Yu., Kranigk J., Mießen G., Panfyorov O., Vygodskaya N., Gravenhorst G. (1996): Modelling three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in Sloping coniferous stands. *Biomass and Bioenergy*, 2/3: S.189-200.
- Knyazikhin Yu., Mießen G., Panfyorov O., Gravenhorst G. (1997): Small-scale study of three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in a forest. *Agric. For. Meteorol.* 88: S.215-239.
- Knyazikhin Yu., Kranigk J., Myneni R. B., Panfyorov O., Gravenhorst G. (1998): Influence of small-scale structure on radiative transfer and photosynthesis in vegetation canopies. *J. of Geophys. Res.*, Vol 103, No. D6: S.6133-6144.

- Kranigk J., Gravenhorst G. (1993): Ein dreidimensionales Modell für Fichtenkronen. Allg. Forst- u. J. -Ztg. 164, Jg. 8: S.146-149.
- Kranigk J., Gruber F., Heimann J., Thorwest A. (1994): Ein Modell für die Kronenraumstruktur und die räumliche Verteilung der Nadeloberfläche in einem Fichtenbestand. Allg. Forst- u. J. -Ztg. 165, Jg. 10-11: S.193-197.
- Kucharik C. J., Norman J., M., Gower S. T. (1998a): Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. Agric. For. Meteorol. 91:S.69-88.
- Kuchling H. (1989): Taschenbuch der Physik. 12., durchges. Aufl., Verlag Harri Deutsch Frankfurt/Main.
- Kuuluvainen T., Pukkala T. (1987): Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade. Agric. For. Meteorol. 40: S.215-231.
- Lambert R., Peeters A., Toussaint B. (1999): LAI evolution of a perennial ryegrass crop estimated from the sum of temperatures in spring time. Agric. For. Meteorol. 97, S.1-8.
- Lang A. R. G., Yueqin X. (1986): Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. Agric. For. Meteorol. 37: S.229-243.
- Lang A. R. G. (1987): Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. Agric. For. Meteorol. 41: S.179-186.
- Langholz H., Häckel H. (1985): Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung und Korrelationen mit der Globalstrahlung. Meteorol. Rdsch. 38, S. 75-82.
- Larcher W. (1973): Ökologie der Pflanzen. UTB-Taschenbuch Nr. 232. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Lauscher F., Schwabl W. (1934): Untersuchungen über die Helligkeit im Walde und am Waldrand. Met. Zeitschr., Biokl. Beibl. 1: S.60-65.
- Lemeur R., Blad B. L. (1974): A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. Agric. Meteorol. 14, S.255-286.
- Levy P. E., Jarvis P. G. (1999): Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in HAPEX-Sahel. Agric. For. Meteorol. 97, S.199-212.
- Li X., Strahler A. H. (1986): Geometrical-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 24, S.906-919.
- Lindroth A., Perttu K. (1981): Simple calculation of extinction coefficient of forest stands. Agric. Meteorol. 25, S.97-110.
- Liou K.-N. (1980): An introduction to atmospheric radiation. Academic Press Inc. New York.

- Lockhart J. A. (1961): Mechanism of the photoperiodic process in higher plants. In: *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, hg. von Ruhland W. in Gemeinschaft mit Ashby E., Bonner J., Geiger-Huber M., James W. O., Lang A., Müller D., Stålfelt M. G., Band XVI: *Außenfaktoren in Wachstum und Entwicklung*, redigiert von Melchers G., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, S. 390-438.
- Lockhart J. A., Brodführer-Franzgrote U. (1961): The effects of ultraviolet radiation on plants. In: *Handbuch der Pflanzenphysiologie*, hg. von Ruhland W. in Gemeinschaft mit Ashby E., Bonner J., Geiger-Huber M., James O. W., Lang A., Müller D., Stålfelt M. G., Band XVI: *Außenfaktoren in Wachstum und Entwicklung*, redigiert von Melchers G., Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, S. 532-554.
- McCree K. J. (1966): A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 3, S.353-366.
- McCree K. J. (1972a): The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9, S.191-216.
- McCree K. J. (1972b): Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.* 10: S.443-453.
- McLellan A. J., Frandland B. (1985): A simple field method for measuring light quality: seasonal changes in a temperate deciduous wood. *Photochem. Photobiol.* 42: S.689-695.
- McPherson H. G. (1969): Photocell-filter combinations for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 6, S.347-356.
- Middleton E. M., Chen S. S., Rusin R. J., Mitchell S. K. (1997): Optical Properties of Black Spruce and Jack Pine Needles at BOREAS Sites in Saskatchewan, Canada. *Can. J. of Remote Sens.* 23, No. 2: S.108-119.
- Miessen G. (1994): Modellierung des dreidimensionalen Transports von photosynthetisch aktiver Strahlung in einem Fichtenbestand im Solling. Master thesis. Inst. of Bioclimatology, Göttingen. S.63ff.
- Mitscherlich G. (1981): Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Band 2: *Waldklima und Wasserhaushalt*. 2., überarb. Aufl., J. D. Sauerländer's Verlag Frankfurt/Main.
- Mohr H. (1969): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

- Möller F. (1973): Einführung in die Meteorologie. Physik der Atmosphäre. 2 Bde. Mannheim (= B.I. Hochschultaschenbuch Bd. 276 u. 288.
- Monsi M., Saeki T. (1953): Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap. J. Bot. 14: S.22-52.
- Monteith J. L. (1972): Survey of instruments for Micrometeorology. IBP Handbook No. 22. Blackwell Scientific Publications Oxford, London, Edinburgh, Melbourne.
- Monteith J. L. (1973): Principles of environmental physics. Edward Arnold, London, Ch. 3. S.24-25.
- Monteith J. L., Unsworth M. H. (1990): Principles of Environmental Physics. 2. Auflage, Edward Arnold, London, 241S.
- Moon P., Spencer D. E. (1942): Illumination from a non-uniform sky. Illuminating Eng. 37, S.707-726.
- Mosandl R. (1984): Löcherhieb im Bergmischwald. Ein walsbauökologischer Beitrag zur Femelschlagverjüngung in den Chiemgauer Alpen. Forstl. Forschungsber. München 61. 298S.
- Myneni R. B., Asrar G., Kanemasu E. T., Lawlor D. J., Impens I. (1986a): Canopy architecture, irradiance distribution on leaf surfaces and consequent photosynthetic efficiencies in heterogeneous plant canopies. Part I. Theoretical consideration. Agric. For. Meteorol. 37: S.189-204.
- Myneni R. B., Asrar G., Wall G. W., Kanemasu E. T., Impens I. (1986b): Canopy architecture, irradiance distribution on leaf surfaces and consequent photosynthetic efficiencies in heterogeneous plant canopies. Part II. Results and discussion. Agric. For. Meteorol. 37: S.205-218.
- Myneni R. B., Ross J., Asrar G. (1989): A Review on the Theory of Photon Transport in Leaf Canopies. Agric. For. Meteorol. 45: S.1-153.
- Myneni R. B. (1991): Modeling radiative transfer and photosynthesis in three-dimensional vegetation canopies. Agric. For. Meteorol. 55: S.323-344.
- Myneni R. B., Ross J. (Eds.) (1991): Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Springer, Berlin, 565 Seiten.
- Myneni R. B., Marshak A., Knyazikhin Yu., Asrar G. (1991): Discrete Ordinates Methods for Photon Transport in Leaf Canopies. In: Myneni R. B., Ross J. (Eds.), Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Springer, Berlin, S. 45-109.

- Nägeli W. (1940): Lichtmessungen im Freiland und in geschlossenen Altholzbeständen. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswesen 21: S.250-306.
- Neumann H. H., Hartog G. den, Shaw R. H. (1989): Leaf area Measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. Agric. For. Meteorol. 45, S. 325-345.
- Nilson T. (1977): A theory of radiation penetration into non-homogeneous plant canopies, In: The Penetration of Solar Radiation Into Plant Canopies, S. 5-70, Estonian Acad. Sci., Tartu, Estonia.
- Nilson T. (1992): Radiative transfer in nonhomogeneous plant canopies. In: G. Stanhill (Eds.), Advances in Bioclimatology 1. Springer-Verlag, Berlin, S.59-88.
- Norman J. M., Welles J. M. (1983): Radiative transfer in an array of canopies. Agron. J. 75: S.481-488.
- Norman J. M., Jarvis P. G. (1975): Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). V. Radiation penetration theory and a test case. J. Appl. Ecol., 12: S.839-878.
- Ögren E., Sjöström M. (1990): Estimation of the effect of photoinhibition on the carbon gain in leaves of a willow canopy. Planta 181: S.560-567.
- Oker-Blom P., Kellomaki S. (1981): Light regime and photosynthetic production in the canopy of a Scots pine stand during a prolonged period. Agric. Meteorol. 24: S.185-199.
- Oker-Blom P., Kellomaki S. (1982): Effect of angular distribution of foliage on light absorption and photosynthesis in the plant canopy: theoretical computations. Agric. Meteorol. 26: S.105-116.
- Oker-Blom P., Kellomaki S. (1983): Effect of grouping of foliage on within-stand and within-crown light regime: comparison of random and grouping canopy models. Agric. For. Meteorol. 28: S.143-155.
- Oker-Blom P., Kellomaki S., Smolander H. (1983): Photosynthesis of a scots pine shoot: the effect of shoot inclination on the photosynthetic response of a shoot subjected to direct radiation. Agric. Meteorol. 29: S.191-206.
- Oker-Blom P. (1985a): Photosynthesis of a scots pine shoot: simulation of the irradiance distribution and photosynthesis of a shoot in different radiation fields. Agric. For. Meteorol. 34: S.31-40.
- Oker-Blom P. (1985b): The influence of penumbra on the distribution of direct solar radiation in a canopy of Scots pine. Photosynthetica 19 (3): S.312-317.

- Oker-Blom P., Pukkala T., Kuuluvainen T. (1989a): Relationship between radiation interception and photosyntheses in forest canopies: effect of stand structure and latitude. *Ecol. Modelling* 49: S.73-87.
- Oker-Blom P., Smolander H., Lahti T. (1989b): A comparison of the photosynthetic radiation response of Scots pine shoots in direct and diffuse radiation. *Ann. Sci. For.* 46: S.469s-472s.
- Oker-Blom P., Kaufmann M. R., Ryan M. G. (1991): Performance of a canopy light interception model for conifer shoots, trees and stands. *Tree Physiology* 9: S.227-243.
- Ondok J. P. (1977): Regime of global and photosynthetically active radiation in helophyte stands. *Studie CSAV* 10. Academia, Praha, S.112ff.
- Palva L., Garam E., Manoochehri F., Sepponen R., Hari P., Rajala K., Ruotoistenmäki H., Seppälä I. (1998a): A novel multipoint measuring system of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 89: S.141-147.
- Palva L., Garam E., Siivola, E., Sepponen R., Hari P. (1998b): Quantifying spatial variability of photosynthetically active radiation within canopies using a multipoint measuring system. *Agric. For. Meteorol.* 92: S.163-171.
- Panfyorof O. (1998): mündliche Mitteilung, Institut für Bioklimatologie der Georg-August Universität Göttingen.
- Parisi A. V., Wong J. C. F., Moor G. I. (1997): Assessment of the exposure to biologically effective UV radiation using a dosimetric technique to evaluate the solar spectrum. *Phys. Med. Biol.* 42: S.77-88.
- Parisi A. V., Wong J. C. F., Randall C. (1998): Simultaneous assessment of photosynthetically active and ultraviolet solar radiation. *Agric. For. Meteorol.* 92: S.97-103.
- Pereira A. R., Machado E. C., de Camargo M. B. P. (1982): Solar radiation regime in three cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) canopies. *Agric. Meteorol.* 26: S.1-10.
- Pierce L. L., Running S. W. (1988): Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology* 69, S.1762-1767.
- Pokrowski G. I. (1929): Über die Helligkeitsverteilung am Himmel. *Physikal. Zeitschr.* 30: S.697-700.
- Pretzsch H., Kahn M., Grote R. (1998): Die Fichten- Buchen- Mischbestände des Sonderforschungsbereiches „Wachstum oder Parasitenabwehr?“ im Kranzberger Forst. *Forstw. Cbl.* 117, 241-257.

- Pukkala T., Becker P., Kuuluvainen T., Oker-Blom P. (1991): Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies. *Agric. For. Meteorol.* 55: S.295-307.
- Pukkala T., Kuuluvainen T., Steneberg P. (1993): Below-canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal *Pinus sylvestris* stand. *Scand. J. For. Res.* 8: S.313-325.
- Ramann E. (1911): Lichtmessungen in Fichtenbeständen. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 87, S. 401-406.
- Rao C. R. N. (1984): Photosynthetically active components of global solar radiation: Measurements and model computations. *Arch. Meteorol., Geophys., Bioklimatol., Ser. B* 34: S.353-364.
- Reifsnyder W. E., Furnaval G. M., Horowitz J. L. (1971): Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies. *Agric. Meteorol.* 9: S.21-37.
- Reitmayer H. (1997): Entwicklung und Aufbau eines Messgerätes zur spektralen Analyse mikrometeorologischer Strahlungsverhältnisse im Kronenraum von Waldbäumen. Unveröffentl. Diplomarbeit. Physik- Department der Technischen Universität München, Fachbereich E 15. 81S.
- Renger G. (1978): Photosynthese. In: *Biophysik. Ein Lehrbuch*, hg. von Hoppe W., Lohmann W., Markl H., Ziegler H., korrigierter Nachdruck der ersten Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, S. 415-441.
- Rich P. M., Clark D. B., Clark D. A., Oberbauer S. F. (1987): Canopy photography for assessment of local environment of tropical forest trees and palms. *Bull. Ecol. Soc. America* 68: S.397.
- Rich P. M. (1990): Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sens.* 5, S.13-29.
- Richter T., Fukshansky L. (1996a): Optics of a Bifacial Leaf: 1. A Novel Combined Procedure for Deriving the Optical Parameters. *Photochemistry and Photobiology* 63 (4): S.507-516.
- Richter T., Fukshansky L. (1996b): Optics of a Bifacial Leaf: 2. Light Regime as Affected by the Leaf Structure and the Light Source. *Photochemistry and Photobiology*, 63 (4): S.517-527.
- Rock N., Williams D. L., Moss D. M., Lauten G. N., Kim M. (1994): High-spectral resolution field and laboratory optical reflectance measurements of red spruce and eastern hemlock needles and branches. *Remote Sens. Environ.* 47: S.176-189.

- Roderick M. L. (1999): Estimating the diffuse component from daily and monthly measurements of global radiation. *Agric. For. Meteorol.* 95, S.169-185.
- Roedel W. (1992): *Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre.* Berlin Heidelberg.
- Rosenberger D. (1977): Optische Informationsübertragung mit Glasfasern. *Physik in unserer Zeit* 1, S. 3-9.
- Ross J., Nilson T. (1968): The calculation of photosynthetically active radiation in plant communities, In: *Solar Radiation Regime in Plant Stands.* S.5-54, Estonian Acad. Sci., Inst. Phys. Astron., Tartu, Estonia.
- Ross J. (1970): Mathematical models of photosynthesis in a plant stand. In: I. Setlik (Ed.), *Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity.* Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen, S.29-45.
- Ross J. (1975): Radiative transfer in plant communities. In: J. L. Monteith (Ed.), *Vegetation and the Atmosphere, Vol. 1: Principles.* Academic Press, New York, S.13-55.
- Ross J. (1981): The radiation regime and architecture of plant stands. *Tasks for vegetation sciences* 3, hg. von Lieth H., Dr. W. Junk Publishers The Hague, Boston, London.
- Ross J., Marshak A. (1984): Calculation of solar radiation reflection from plant cover using the Monte Carlo method. *Sov. J. Remote Sen.* 5: S.58-67 (in Russian, translated into English).
- Roux X. Le, Gauthier H., Bégué A., Sinoquet H. (1997): Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agric. For. Meteorol.* 85: S.117-132.
- Runyon J., Waring R. H., Goward, S. N., Welles J. M. (1994): Environmental limits on net primary production and light use efficiency across the Oregon transect. *Ecol. Appl.* 4, S.226-238.
- Sattin M., Zuin M. C., Sartorato I. (1994): Light quality beneath field grown maize, soybean and wheat canopies: R:FR variations. *Physiol. Plant.*, 91: S.322-328.
- Sattin M., Milne R., Deans J. D., Jarvis P. G. (1997): Radiation interception measurement in poplar: sample size and comparison between tube solarimeters and quantum sensors. *Agric. For. Meteorol.* 85: S.209-216.
- Sauberer F., Härtel O. (1959): *Pflanzen und Strahlung.* Geest und Portig, Leipzig.
- Schimpf D. J., Danz N. P. (1999): Light passage through leaf litter: variation among northern hardwood trees. *Agric. For. Meteorol.* 97: S.103-111.
- Shultis J. K., Myneni R. B. (1988) : Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering. *J. Quant. Spectrosc. Radiant Transfer*, 39: S.115-129.

- Sinclair T. R., Knoerr K. R. (1982): Distribution of photosynthetically active radiation in the canopy of a loblolly pine plantation. *J. Appl. Ecol.* 19: S.183-191.
- Sinoquet H., Rakocevic M., Varlet-Grancher C. (2000) : Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. *Agric. For. Meteorol.* 101: S.251-263.
- Sivakumar M. V. K., Virmani S. M. (1984): Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 31: S. 131-141.
- Smith H. (Ed.) (1981): *Plants and the daylight spectrum*. London: Academic Press: 508 S.
- Smith H., Morgan D. C. (1981): The spectral characteristics of the visible radiation incident upon the surface of the earth. In: Smith (Ed.): *Plants and the daylight spectrum*. London: Academic Press: S.3-20.
- Smolander H (1984): Measurement of fluctuating irradiance in field studies of photosynthesis. *Acta Forest. Fenn.* 187: S.1-56.
- Spitters C. J. T., Toussaint H. A. J. M., Goudriaan J. (1986): Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. *Agric. For. Meteorol.* 38: S.217-229.
- Spitters C. J. T. (1986): Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agric. For. Meteorol.* 38: S.231-242.
- Stadt K. J., Lieffers V. J. (2000): MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands. *Agric. For. Meteorol.* 102: S.235-252.
- Stamper J. H., Allen J.C. (1979): A model of the daily photosynthetic rate in a tree. *Agric. Meteorol.* 20, S.459-481.
- Szeicz G. (1974): Solar radiation for plant growth. *J. Appl. Ecol.* 11, S.617-637.
- Szwarcbaum I., Shaviv G. (1976): A monte-carlo model for the radiation field in plant canopies. *Agric. Meteorol.* 17: S.333-352.
- Tanner V., Eller B. M. (1985): Veränderung der spektralen Eigenschaften der Blätter der Buche (*Fagus silvatica* L.) von Laubaustrieb bis Laubfall. *Allg. Forst- u. J. -Ztg.* 157. Jg. 6.
- Udo S. O., Aro T. O. (1999): Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. *Agric. For. Meteorol.* 97, S.21-31.
- Vales D. J., Bunnell F. L. (1988): Relationships between transmission of solar radiation and coniferous forest stand characteristics. *Agric. For. Meteorol.* 43, S.201-223.

- Van Gardingen P. R., Jackson G. E., Hernandez-Daumas S., Russell G., Sharp L. (1999): Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 94, S.243-257.
- Vezina P. E., Pech G. Y. (1964): Solar radiation beneath conifer canopies in relation to crown closure. *For. Sci.* 10: S.443-451.
- Vezina P. E., Boulter D. W. K. (1966): The spectral composition of near ultraviolet and visible radiation beneath forest canopies. *Can. J. Bot.* 44: S.1267-1284.
- Vogelmann T. C., Björn L. O. (1984): Measurement of light gradients and spectral regime in plant tissue with a fiber optic probe. *Physiol. Plant.* 60: S.361-368.
- Wagner S., Nagel J.(1992): Ein Verfahren zur PC- gesteuerten Auswertung von Fisheye Negativ-Fotos für Strahlungsschätzungen. *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 163: S.110-116.
- Wang Y.-P., Jarvis P. G. (1990): Description and validation of an array model - MAESTRO. *Agric. For. Meteorol.* 51: S.257-280.
- Watson D. J. (1947): Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot* 11, S.41-76.
- Weiss A., Norman J. M. (1985): Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agric. For. Meteorol.* 34, S.205-213.
- Whitford K. R. (1995): Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agric. For. Meteorol.* 74: S.237-249.
- Wijk W. R. van, Scholte Ubing D. W. (1963): Radiation. In: *Physics of plant environment*, hg. von Wijk W. R. van, North-Holland Publishing Company Amsterdam, S. 62-101.
- Williams D. L. (1991): A Comparison of Spectral Reflectance Properties at the Needle, Branch, and Canopy Level for Selected Conifer Species. *Remote Sensing Environ.* 35: S.79-93.
- Zavitkovski J. (1982): Characterization of light climate under canopies of intensively-cultured hybrid poplar plantations. *Agric. Meteorol.* 25: S.245-255.
- Zelawski W., Szaniawski R., Dybczynski W., Piechurowski A. (1973): Photosynthetic capacity of conifers in diffuse light of high illuminance. *Photosynthetica* 7, S.351-357.

9 Abkürzungsverzeichnis

a	Kernradius
CCD	Charge Coupled Device
CD	Compact Disc
CNC	Computerized Numerical Control
CS	Clear Sky
Ct	Count, Zählimpuls
DIN	Deutsche Industrienorm
F	partielle Ableitung einer Funktion
FR	Far Red, 720 nm - 740 nm
$\tilde{\alpha}_L$	Streuphasenfunktion
G	Globalstrahlung
g_L	Blattwinkelverteilungsfunktion
h	die Sonnenhöhe in Grad
H	diffuse Himmelsstrahlung
I	direkte Sonnenstrahlung
I_i	Strahlungsfluss in der Ebene i
I_0	Strahlungsfluss in den Bestand hinein
$I(r, \dot{U})$	Intensitätsverteilungsfunktion
IPAR	Intercepted PAR
k	Extinktionskoeffizient
λ_0	Vakuumlichtwellenlänge
L	charakteristische Länge
L_i	LAI des Bestandes über der Ebene i
LAI	Leaf Area Index
LWL	Lichtwellenleiter
Lx	Lux , Lumen pro Quadratmeter
MCS	Multi-Channel-Spektrometer
MCU	Micro-Computer-Unit
n_1, n_2	Brechungsindex
NA	Numerische Apertur
NIR	Near Infrared, 700 nm - 3 μ m
NNIR	Near Near Infra Red, 700 nm - 850 nm

\dot{U}	Raumwinkel
P_A	Ausgangsleistung
PC	Personal Computer
P_E	Eingangsleistung
POM	Peroxy methylen
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmetacrylat
POF	Polymer-Optische-Faser
PUR	Photosynthetically Usable Radiation
Q	kurzwellige Strahlungsbilanz
R	Red, 650 nm - 670 nm
r	Ortsvektor im Raum
\acute{o}	Streuwechselwirkungskoeffizient
SAP	Standalone-Applikation-Programmierung
SI	Système International
SOC	Standard Overcast Sky
u_L	Blattflächendichte
UOC	Uniform Overcast Sky
V	normierter Strukturfaktor

Lebenslauf

- 15.09.1966 geboren in Teisendorf/Oberbayern
- 1979 - 1983 Realschule in Freilassing, technischer Zweig
- 1983 - 1987 Ausbildung zum Elektromechaniker am Fernmeldeamt Traunstein
- 1987 - 1989 Berufsoberschule Altötting, technischer Zweig
- 1989 - 1990 Grundwehrdienst
- 1990 - 1997 Studium der Allgemeinen Physik an der Technischen Universität München
Thema der Diplomarbeit: „Entwicklung und Aufbau eines Messgerätes zur spektralen Analyse mikrometeorologischer Strahlungsverhältnisse im Kronenraum von Waldbäumen“. Betreuer: Prof. Dr. E. Nolte, Prof. Dr. P. Fabian.
- 1997 - 2000 wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Bioklimatologie und Immissionsforschung der Ludwig- Maximilians- Universität München (seit 1.10.1999 Technische Universität München).
- Anfertigung der Dissertation