

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
Department für Ökologie—Lehrstuhl für Ökoklimatologie

Messung und Modellierung der spektralen Strahlungsverteilung in einem Fichten-Buchen-Mischbestand

Michael Leuchner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Univ.-Prof. Dr. Anton Fischer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Peter Fabian, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr. Hans-Dietrich Quednau
3. Univ.-Prof. Dr. Dominik Faust, Technische Universität Dresden

Die Dissertation wurde am 27.12.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 08.02.2006 angenommen.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meiner Verlobten Cornelia und meinen Eltern für die großartige Unterstützung in all den Jahren dieses Vorhabens danken.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Dr. h.c. Peter Fabian für die Möglichkeit, diese Arbeit am Lehrstuhl für Ökoklimatologie (vormals Bioklimatologie und Immissionsforschung) durchführen zu können, für seine Betreuung und seine uneingeschränkte Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Ich danke ...

Dr. Herbert Werner für die unermüdlichen Stunden der Diskussion, die für das Entstehen dieser Arbeit unverzichtbar waren, für die einzigartige Hilfe bei der aufwendigen Erstellung der Strahlungsmessanlage und für das Korrekturlesen

Prof. Dr. Hans-Dietrich Quednau und Prof. Dr. Dominik Faust für die Begutachtung der Arbeit sowie Prof. Dr. Anton Fischer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission

meinen Arbeitskollegen Nikolaus Hofmann, Anton Knötig und Christian Heerdt für die Hilfe beim Aufbau und der Instandhaltung der Anlage sowie für viele freundschaftliche und lustige Stunden außerhalb der Arbeitszeit

allen anderen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die sehr angenehme und freundschaftliche Atmosphäre und die hervorragende Zusammenarbeit

Dr. Thomas Seifert für die aufwendige Bereitstellung der Blattflächendichtedaten, Markus Löw und Rosemarie Weigt für die Bereitstellung der Boniturdaten

allen Hiwis, die bei der Erstellung der Arbeit mit viel Engagement beteiligt waren

Thomas Korber für das Korrekturlesen und seine L^AT_EX-Tipps

Uwe Kratzer für die kostenlose Herstellung der Hochpräzisionsmatrix, Bruno Löw für das aufwendige Schweißen der Schutzkäfige und Peter Auer für die Spende der Glasfaser-Schutzhüllen

der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten für die Bereitstellung der Mittel zur Durchführung dieser Arbeit.

Zusammenfassung

Quantität und Qualität der solaren Strahlung sind entscheidende Steuergrößen für das Wachstum und die Konkurrenzsituation in strukturreichen Pflanzenbeständen. Für das Waldwachstum wirkt die Strahlung sowohl direkt über den Spektralbereich der Photosynthese als auch wachstumssteuernd über Blau- und Rotlichtanteile des Spektrums durch Pigmentabsorption in den Blattorganen der Pflanzen. In einem heterogenen Pflanzenbestand variiert das Strahlungsangebot räumlich, zeitlich und spektral extrem. Um die räumlich hochvariable Konkurrenzsituation und die Wachstumsdynamik in Mischbeständen wirklichkeitsnah charakterisieren zu können, ist eine detaillierte Parametrisierung der Strahlung, insbesondere der entscheidenden Spektralbereiche, notwendig.

Hierfür wurde eine neuartige Strahlungsmessanlage entwickelt, die räumlich, zeitlich und spektral hochauflösend das Strahlungsangebot eines 30 m hohen Fichten-Buchen-Mischbestandes bestimmt. An 130 Messorten wird auf einer Fläche von $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ das jeweilige Strahlungsangebot im Spektralbereich $360\text{ nm} - 1020\text{ nm}$ mit raumintegrierend messenden ($4\pi\text{ sr}$) sphärischen Sensoren mit einer spektralen Auflösung von $0,8\text{ nm}$ innerhalb von 2 min quasi-simultan ermittelt. Die auf Glasfasertechnologie basierenden Messfühler mussten dafür selbst entwickelt und produziert werden. Aus diesem Grund wurden spezielle Einrichtungen zur Konditionierung und Kalibrierung in höchster Präzision konstruiert. Ergebnisse der Kalibrierung zeigen, dass bei der Strahlungseinkopplung die Prämisse der Richtungsunabhängigkeit gegeben ist. Die Sensoren wurden in 25 Vertikalprofilen mit je sechs Ebenen angebracht. Die in dieser Form einzigartige Anlage zur hochauflösenden Bestimmung der spektralen Strahlungsverteilung in einem Altbestand läuft kontinuierlich seit dem 13.10.2004.

Ein Vergleich der kosinus-korrigierten Standard-Planarsensoren mit den in dieser Arbeit entwickelten raumintegrierenden Sensoren, die die an der Pflanze tatsächlich eintreffende Strahlungsquantität und -qualität besser widerspiegeln, zeigt große Unterschiede in den beiden Messmethoden. Vor allem bei niedrigen Sonnenständen können die Messwerte um den Faktor sechs auseinanderliegen, was zu signifikanten Fehlern in der Berechnung der Photosyntheseleistung und der photomorphogenetischen Vorgänge führen kann.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen einen saisonal, artspezifisch und bewölkungsabhängig variierenden starken Zusammenhang zwischen der photomorphogenetisch aktiven Strahlung, ausgedrückt durch das Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis (R/FR), und dem Beschattungsgrad, ausgedrückt durch den relativen Grad der Photonenflussrate. Häufigkeitsverteilungen und statistische Kenngrößen des quantitativen Auftretens verschiedener spektraler Bereiche in unterschiedlichen Regionen der Baumkrone und am Bestandesboden liefern neue Erkenntnisse über die komplexen und hochvariablen Strahlungsverhältnisse in Mischbeständen. Die Beobachtungen zeigen höhere durchschnittliche Strahlungswerte am Bestandesboden unterhalb der Buchen bei

voller Belaubung im Vergleich zur Fichte, während im Kronenraum die Verhältnisse umgekehrt sind. Kurzzeitige Erhöhungen der Strahlungsquantität in Lichtflecken und im Halbschatten sind mit einer Veränderung der Strahlungsqualität verbunden. Aufgrund der neuen Erkenntnisse lassen sich jetzt phänologische Entwicklungsstadien wie beispielsweise Laubaustrieb und Laubfall der Buche durch die Messung des R/FR mit einem beliebigen Sensor in der Buchenkrone mit hoher statistischer Plausibilität beschreiben. Die gemessenen Extinktionsvertikalprofile dienen zur Ermittlung von artspezifischen spektralen Extinktionskoeffizienten.

Um die aus den Messungen gewonnenen Erkenntnisse für Photosynthese- und Wachstumsmodelle anwendbar zu machen, wurde ein für Fichten-Reinbestände entwickeltes dreidimensionales Strahlungstransportmodell erheblich erweitert und an die Gegebenheiten eines Mischbestandes angepasst. Insbesondere wurde erstmals ein spektrales Modul implementiert, das es ermöglicht, die wichtigen photosynthetisch und photomorphogenetisch relevanten Spektralbereiche zusätzlich zu den quantitativen Ergebnissen zu simulieren. Es liefert als Ergebnis neben der PAR-Quantität unter anderem die spektrale Zusammensetzung des PAR-Bereichs sowie die dreidimensionale Verteilung des R/FR. Das Modell wurde einer Sensitivitätsanalyse unterzogen und anhand der gemessenen Daten validiert. Es kann in der jetzigen Form als wichtiger Bestandteil von Wachstums- und Konkurrenzmodellen dienen, in denen die Steuergröße Strahlung die entscheidende Rolle spielt.

Summary

The quantity and quality of solar radiation play a vital role for growth and competition within heterogeneous forest ecosystems. Radiation affects the increase of biomass directly by its intensity within the spectral band of photosynthesis, and regulates growth, by means of absorption in the blue and red fraction of the solar spectrum by pigments of phytoelements. The spatial, temporal, and spectral distribution within a heterogeneous plant stand can vary to a large extent. For a realistic characterization of spatially highly variable growth dynamics and competition in mixed stands, detailed parametrization of radiation, especially of crucial spectral bands, is required.

Thus, a novel multi-sensor monitoring system was developed for measuring the radiation field within a 30 m tall mature spruce-beech-stand with high resolution with respect to wavelength, space, and time. At 130 positions within an area of 25 m × 25 m the respective amount of radiation within the range of 360 nm – 1020 nm is determined by space-integrating (4π sr) spherical sensors near-simultaneously within 2 min and a spectral resolution of 0,8 nm. The applied sensors, based on fiber optic technology, had to be developed and manufactured proprietarily. Special devices for conditioning and calibration at a high level of accuracy were constructed. The results of the calibration show that the assumption of directional independency of the radiation input is valid. The sensors were installed in six levels at 25 vertical profiles. The unique system for highly resolved determination of the spectral radiation distribution within a mature mixed stand has been running continuously since 13.10.2004.

A comparison of standard cosine-corrected flat plate detectors with the specially developed spherical sensors, which are superior to exhibit the actual quantity and quality of radiation impinging on a plant, shows major differences between the two methods of measurement. Particularly at low solar altitude, measured radiation values can differ by a factor of six, which can cause significant errors in calculations of photosynthetic and photomorphogenetical processes.

The results of the measurements display a strong relation between the photomorphogenetic active radiation, expressed by the red / far red ratio (R/FR), and the level of shading, expressed by the fraction of photon fluence rate. This relation varies seasonally, type-specifically, and by cloudiness. Frequency distributions and statistical parameters of the quantitative occurrence of different spectral bands within different areas of the canopy and at the forest ground provide new insights in the complex and highly variable radiation field within mixed stands. Observations show higher mean levels of radiation at the forest ground under beech at full foliage compared to spruce and a changed situation within the canopy. Temporary enhancements of the radiation quantity caused by sunflecks or penumbra are associated to modifications in the spectral composition. Phenological stages, such as leaf unfolding and leaf fall, can be described by measuring R/FR at an arbitrary position within the beech

canopy with a high statistical plausibility. The acquired extinction vertical profiles serve for determination of type-specific spectral extinction coefficients.

In order to make the gained perceptions applicable for photosynthesis and growth models, a three-dimensional radiative transport model that had been developed for pure spruce stands, was enhanced and adapted to the conditions of a mixed stand. Particularly, a spectral module that enables simulation of not only the quantitative components, but also the crucial photosynthetically and photomorphogenetically relevant wave bands was implemented for the first time. In addition to the PAR quantity, the spectral composition of the PAR band as well as the three-dimensional distribution of R/FR is calculated. The model was subject to a sensitivity analysis and was validated by measured data. At the present stage it can be used as an important element of growth and competition models in which the factor radiation plays the key role.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung*	Beschreibung	Einheit
B/R	Blau-Rot-Verhältnis	[-]
CS	wolkenlos	
LWL	Lichtwellenleiter	
MAR (I_m)	(photo-)morphogenetisch aktive Strahlung	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
MCS	Multi-Channel-Spektrometer	
MEZ	mitteleuropäische Zeit	
NIR	nahes Infrarot	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
OVC	komplett bewölkt	
PAR (I_p)	photosynthetisch aktive Strahlung	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
PFR (ϕ)	Photonenflussrate / Raumphotonenfluss	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
PFR _{rel}	relative Photonenflussrate / Raumphotonenfluss	[-]
PMMA	Polymethylmetacrylat	
POM	Polyoximethylen	
PPFD (ϕ_d)	photosynthetische Photonendichte	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
PPFR (ϕ_p)	photosynthetische Photonenflussrate	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
PPFR _{rel} ($\phi_{p,r}$)	relative photosynthetische Photonenflussrate	[-]
PUR	photosynthetisch nutzbare Strahlung	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
R/FR (ζ)	Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis	[-]
r_L	Blattreflexionskoeffizient	[-]
UV	Ultraviolett	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
t_L	Blatttransmissionskoeffizient	[-]
λ	Wellenlänge	[nm]
σ	Extinktionskoeffizient	[-]
$\sigma_{s,\lambda}$	differentieller Streukoeffizient	[-]

* es werden nur die häufig verwendeten Abkürzungen aufgelistet

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Zusammenfassung	III
Summary	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Hintergrund und Konzept	3
1.1 Einleitung	3
1.2 Aktueller Stand der Forschung	3
1.3 Ziel der Arbeit	8
1.4 Standortbeschreibung der Versuchsfläche Kranzberger Forst	8
2 Physikalische und biologische Grundlagen	10
2.1 Strahlungsgrößen, Definitionen, Einheiten	11
2.2 Die solare Strahlung und ihre spektralen Eigenschaften	14
2.2.1 Das solare Spektrum	15
2.2.2 Einfluss der Atmosphäre auf die spektrale Zusammensetzung	15
2.2.3 Spektrale Zusammensetzung im Bestand	18
2.3 Theorie der Lichtwellenleiter	19
3 Messung der solaren Strahlung im Bestand	23
3.1 Sphärische Sensoren zur spektralen Strahlungsmessung	23
3.1.1 Konfektionierung der Lichtwellenleiter	26
3.1.2 Aufbau und Konzeption der Kalibrierung	26
3.1.2.1 Strahlungsquellen	27
3.1.2.2 Lampenversorgung und Steuerung	28
3.1.2.3 Spektrometer	29
3.1.2.4 Versuchsaufbau	30
3.1.2.5 Kalibriervorgang	31
3.1.2.6 Kalibrierfaktoren	31
3.1.3 Richtungscharakteristik der Sensoren	32
3.2 Experimenteller Aufbau	37
3.2.1 Multi-Channel-Spektrometer-Modul	39
3.2.2 Hochpräzisions-Positionierung	39
3.2.3 Hochpräzisions-Matrix	42
3.2.4 Räumliche Anordnung der Sensoren im Bestand	43
3.2.5 Messwerterfassung und Datenverarbeitung	44
3.3 Ergebnisse und Diskussion der Messungen	45
3.3.1 Vergleich zwischen Planar- und sphärischen Sensoren	45
3.3.2 Strahlungsverteilung im Bestand	48
3.3.3 Beziehung zwischen photosynthetisch und photomorphogene- tisch aktiver Strahlung	72

3.3.4	Strahlungsgrößen als Maß für phänologische Entwicklungsstadien am Beispiel Laubaustrieb und Laubfall der Buche	78
3.3.5	Meteorologisch bedingte Einflüsse auf das Spektrum	83
4	Dreidimensionale Modellierung der spektralen Strahlungsverteilung	86
4.1	Theoretische Grundlagen	86
4.2	Modellbeschreibung	88
4.3	Eingangsparameter	89
4.3.1	Architektur des Bestandes	89
4.3.2	Optische Blatteigenschaften	90
4.3.3	Optische Eigenschaften des Bestandesbodens	91
4.3.4	Meteorologische Bedingungen	91
4.3.5	Umgebung des Bestandes	93
4.3.6	Diskretisierung	93
4.4	Spektrale Erweiterung des Modells	94
4.5	Modellvalidierung	96
4.5.1	Validierung anhand experimentell erhobener Daten	96
4.5.2	Sensitivitätsanalyse	101
4.6	Ergebnisse und Diskussion der Modellierung	102
4.6.1	Verteilung der photosynthetisch aktiven Strahlung	103
4.6.2	Verteilung der photomorphogenetisch aktiven Strahlung	106
4.6.3	Vertikale Veränderung der spektralen Zusammensetzung	108
5	Diskussion	110
	Literatur	116
	Abbildungsverzeichnis	130
	Tabellenverzeichnis	136
	Anhang	137
	Eigene Publikationen	137
	Lebenslauf	137

1 Hintergrund und Konzept

1.1 Einleitung

Die Quantität und Qualität der solaren Strahlung sind neben meteorologischen Bedingungen und der Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen für das Wachstum und die Konkurrenzsituation in strukturreichen Pflanzenbeständen entscheidende Steuergrößen. Für das Waldwachstum wirkt die Strahlung sowohl direkt über den Spektralbereich der Photosynthese als auch wachstumssteuernd über Blau- und Rotlichtanteile des Spektrums durch Pigmentabsorption (z.B. von Chlorophyll a und b, Carotinoide, Phytochrome) in den Blattorganen der Pflanzen. Besonders bedeutsam ist das Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis (R/FR) z.B. bei der Kronenraumbesetzung konkurrierender Arten oder der Verjüngung von Beständen. Für zahlreiche biologische und chemische Vorgänge in Pflanzen stellt die Strahlung den entscheidenden Faktor dar, was bereits durch Begriffe wie Photosynthese, Photomorphogenese, Photoperiodizität, Phototropismus und Phototaxis gezeigt wird.

In einem heterogenen Pflanzenbestand variiert das Strahlungsangebot räumlich und zeitlich extrem. Hier spielen unter anderem die horizontale und vertikale Verteilung der Biomasse, die Raumbesetzungsmuster, die Orientierung der oberirdischen Pflanzenorgane, der Belaubungszustand, das phänologische Stadium, der Sonnenzenitwinkel in Abhängigkeit von Tages- und Jahresgang und meteorologisch-klimatische Bedingungen wie Bewölkungsgrad und Aerosoldichte eine wichtige Rolle. All diese Faktoren beeinflussen die Quantität und Qualität des einfallenden Strahlungsflusses.

Um die räumlich hochvariable Konkurrenzsituation und die Wachstumsdynamik in Mischbeständen wirklichkeitsnah nachbilden zu können, ist eine sehr gute Parametrisierung der Strahlung, insbesondere der oben genannten Spektralbereiche, notwendig. Voraussetzung hierfür sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messungen, um unterschiedliche Strahlungssituationen (wolkenlos/bewölkt) und verschiedene phänologische Phasen mit variierender spektraler Zusammensetzung und variierender räumlicher Verteilung des Strahlungsfeldes zu untersuchen, in Strahlungsmodellen für Mischbestände zu implementieren und diese wiederum zu validieren.

1.2 Aktueller Stand der Forschung

Solare Strahlung zeigt sich für die meisten ökologischen und biologischen Prozesse auf der Erdoberfläche verantwortlich. Sie setzt sich aus einer direkten und einer diffusen Komponente zusammen [GUEYMARD, 1989, SPITTERS ET AL., 1986, BRISTOW ET AL., 1985], die sich in der Intensität [GENDRON ET AL., 1998, HUTCHINSON UND MATT, 1977], der Richtungsverteilung [BJÖRN, 1995, HUTCHINSON UND MATT, 1976, REIFSNYDER ET AL., 1971], der spektralen Zusammensetzung [CAPERS UND CHAZDON, 2004, SMITH, 1981, SMITH UND MORGAN, 1981] und dem Transmissions-

verhalten bei der Durchdringung von Pflanzenbeständen [BRUNNER, 1994, KIMES ET AL., 1987, WEISS UND NORMAN, 1985, GALOUX ET AL., 1981, ANDERSON, 1970] unterscheiden. Bei letzterem Prozess sorgt die wellenlängenselektive Absorption der Strahlung durch Biomasse für eine deutliche Reduktion der Strahlungsintensität, die mit einer Veränderung der spektralen Zusammensetzung einhergeht [CAPERS UND CHAZDON, 2004, AMMER, 2000, SMITH, 1986, HOLMES, 1981]. Das vorhandene Strahlungsklima variiert abhängig von Struktur, Aufbau und Dichte des Bestandes und der Eigenschaften der einfallenden Strahlung qualitativ und quantitativ in einem Altbestand vertikal und horizontal in erheblichem Maße [WAGNER ET AL., 2004, SMOLANDER ET AL., 1994, BALDOCCHI ET AL., 1986, REIFSNYDER ET AL., 1971]. Die dreidimensionale Verteilung der Strahlung im Bestand hat Auswirkungen auf die jeweilige Wachstums- und Konkurrenzsituation [MONSI UND SAEKI, 1953]. Daher ist die Bestimmung von Lichtflecken- und Halbschatteneffekten inner- und unterhalb der Krone und der damit verbundenen plötzlichen Erhöhung der auftreffenden Strahlungsintensität sowie der Veränderung der spektralen Eigenschaften von großem Interesse [MÖTTUS, 2004, ROSS UND SULEV, 2000, CHEN UND BLACK, 1992, ROSS, 1981]. Die Charakterisierung von Lichtflecken und Halbschatten sowie statistische Häufigkeitsverteilungen bzw. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Auftretens dieser Effekte wurden unter anderem von PALVA ET AL. [2001, 1998a, 1998b], PALMROTH ET AL. [1999], GRANT [1997], OLESEN [1992], BALDOCCHI ET AL. [1986] und OKER-BLOM [1985b] durchgeführt.

Die spektrale Zusammensetzung innerhalb eines Bestandes ist von atmosphärischen Bedingungen wie Bewölkungsgrad, Art der Bewölkung und Anteil diffuser und direkter Strahlung [HOLMES, 1981, SMITH UND MORGAN, 1981], sowie von Absorptions-, Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Pflanzenteile [SMITH, 2000, SATTIN ET AL., 1997, BRUNNER, 1994, TANNER UND ELLER, 1985] abhängig. Das Strahlungsfeld setzt sich dabei immer aus einem spektral veränderten und einem durch Bestandeslücken gedrungenem unveränderten Anteil zusammen [BRUNNER, 1993, REIFSNYDER ET AL., 1971]. Der Spektralbereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) ist für die Photosynthese verantwortlich. Er steuert entscheidend den Zuwachs der Pflanzen [OKER-BLOM ET AL., 1991b].

Im Bestand tritt im Vergleich zum Freiland aufgrund der Wellenlängenselektion eine relative Überhöhung des Dunkelrot- und nahen Infrarot-Bereichs (NIR) gegenüber dem PAR-Anteil auf [MYNENI ET AL., 1989, TANNER UND ELLER, 1985, BALDOCCHI ET AL., 1984b, SMITH UND MORGAN, 1981]. Durch die Absorptionseigenschaften der Blattpigmente innerhalb der PAR ist der Anteil des grünen Spektralbereichs zum roten und blauen relativ erhöht.

Für die Morphogenese und Architektur der Pflanzen und als Initiator für Wuchsvorgänge sind spektrale Anteile und Verhältnisse der Strahlung von entscheidender Bedeutung [AMMER, 2003, REITMAYER ET AL., 2002, SMITH, 2000]. Dabei spielen insbesondere das R/FR und der Blaulichtanteil maßgebliche Rollen, da sie direkten Bezug zu Photorezeptoren wie dem Phytochromsystem und den Blaulichtrezeptoren

ren (oft auch als Cryptochrome bezeichnet) aufweisen, die die o.g. Vorgänge in der Pflanze auslösen und steuern [AMMER, 2000, SMITH, 2000, SMITH UND WHITELAM, 1997, MORGAN UND SMITH, 1981]. Veränderungen im R/FR dienen den Pflanzen unter anderem als Signal für Konkurrenz [VARLET-GRANCHER ET AL., 1993, SMITH, 1982]. Das R/FR wird in direkten Bezug zum Stammwachstum, der Keimung von Samen und vielen anderen Effekten gesetzt [AMMER, 2003, GRANT, 1997, SMITH, 1982]. Blaulicht wird zum Beispiel für das Öffnen der Stomata, das Auslösen des Austriebs und der Blattentfaltung sowie für die Induktion von Phototropismus verantwortlich gemacht [CHRISTIE UND BRIGGS, 2001, AHMAD ET AL., 1998]. Allerdings wird das Verhalten der Blaulichtrezeptoren erst langsam verstanden [SMITH, 2000].

Definitionen und Erläuterungen über Strahlungsgrößen und Spektralbereiche wie sie in dieser Arbeit verwendet werden erfolgen ausführlicher in Kap. 2.1.

Um Komponenten der einfallenden Sonnenstrahlung im Freiland und in Pflanzenbeständen zu bestimmen, wurden zahlreiche Messverfahren und -geräte zur direkten Bestimmung von Globalstrahlung, PAR, Beleuchtungsstärke, Strahlungsbilanz etc. entwickelt [REITMAYER ET AL., 2002, AASLYNG ET AL., 1999, PARISI ET AL., 1998, DOHRENBUSCH, 1995, DOHRENBUSCH ET AL., 1995, MONTEITH, 1972, MCPHERSON, 1969, MCCREE, 1966, RAMANN, 1911]. Die direkte und indirekte Ermittlung des in der Baumkrone extinguierten Strahlungsanteils wurde mittels PAR-Sensoren [BÉGUÉ ET AL., 1994, WANG UND JARVIS, 1990] und Quantensensoren [HASSIKA UND BERBIGIER, 1998, RUNYON ET AL., 1994, PIERCE UND RUNNING, 1988] durch simultane Messungen innerhalb und oberhalb des Bestandes, durch Messung der spektralen Reflexion über dem Bestand [HANAN ET AL., 1995b, DAUGHTRY ET AL., 1992, ASRAR ET AL., 1984] und durch Ableitungen aus dem Blattflächenindex (LAI) [HIPPS ET AL., 1983] durchgeführt. Eine weitere Methode stellt die hemisphärische Fotografie mit Fish-eye-Technik [CLEARWATER ET AL., 1999, WAGNER, 1998, RICH, 1990, BECKER ET AL., 1989, CHAZDON UND FIELD, 1987, EVANS UND COOMBE, 1959] oder die Benutzung hemisphärischer Sensoren [HANAN UND BÉGUÉ, 1995a] dar. PARKER ET AL. [2002, 2001] kombinieren zur Bestimmung der Lichttransmission Laser-Altimetrie mit Quantenmessungen im Bestand.

Um direkt an Pflanzenoberflächen messen zu können, sind insbesondere kleine raumbezogene und planare Sensoren und Messgeräte von Interesse [AASLYNG ET AL., 1999, DOHRENBUSCH, 1995, GUTSCHICK ET AL., 1985], da sie zur Parametrisierung von Wuchsgesetzmäßigkeiten und Modellen beitragen können. Dabei spielt auch eine hohe räumliche Auflösung an vielen Messpunkten eine wichtige Rolle, was anhand der Messung der integralen Bestrahlungsstärken durch zahlreiche, an Blättern direkt befestigte Photodioden [GUTSCHICK ET AL., 1985] und durch Lichtwellenleiter (LWL) [PALVA ET AL., 2001, 1998a, 1998b, PALMROTH ET AL., 1999] gezeigt wurde. Letztere wurden mit ihren Enden in einer Haltevorrichtung montiert, in die ein Zweig eingespannt werden kann. Damit kann eine sehr hohe Messdichte auf Zweigebene erreicht werden. Auf Blattebene konnten ebenfalls mit Hilfe von LWL

Gradienten und spektrale Informationen gewonnen werden [VOGELMANN ET AL., 1988, VOGELMANN UND BJÖRN, 1984]. Auch passive Verfahren wie die Anwendung von Dosimetern wurden angewandt [PARISI ET AL., 1998, 1997].

Bei seitlich offenen Beständen, bei der Bestimmung von potentiellen Photosyntheseraten einzelner Äste, aber auch ganzer Bäume [REITMAYER, 2000], zur Wahrnehmung von Konkurrenten [SMITH, 2000, SMITH UND WHITELAM, 1997] und für biologische Systeme im Allgemeinen spielt die seitlich einfallende Strahlung eine sehr wichtige Rolle [BJÖRN UND VOGELMANN, 1996, OKER-BLOM ET AL., 1989a, 1989b]. Deren Messung ist durch planare Sensoren nur eingeschränkt möglich [BJÖRN, 1995, BYRNE, 1966]. Eine raumintegrierende ist der herkömmlichen Messung in diesen Fällen vorzuziehen [BJÖRN UND VOGELMANN, 1996, SMITH, 1982, HARTMANN, 1978, KUBÍN, 1971].

Ein Messsystem zur Spektralanalyse der einfallenden PAR im Fichten-Buchen-Mischbestand wurde im Jahr 2000 im Versuchsbestand Kranzberger Forst installiert [REITMAYER ET AL., 2002, REITMAYER, 2000]. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag vor allem in der räumlich hochauflösenden Messung mit raumintegrierenden und spektral auflösenden Sensoren an 20 Intensivmessästen. Hierzu wurden kugelförmige Sensorköpfe zur Strahlungseinkopplung verwendet, die im Gegensatz zu den sonst häufig eingesetzten Planarsensoren die Strahlung aus allen Raumrichtungen erfassen und somit eine deutlich genauere Charakterisierung der tatsächlich an den Zweigen vorhandenen Strahlungsmenge erlauben.

Die meisten experimentellen Untersuchungen beschränken sich auf die Messung von integralen Strahlungsgrößen wie die PAR oder die Globalstrahlung. Messungen mit spektraler Komponente sind nur vereinzelt anzutreffen [CAPERS UND CHAZDON, 2004, MURAOKA ET AL., 2001, COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ENDLER, 1993, OLESEN, 1992, LEE, 1989, MESSIER UND BELLEFLEUR, 1988, FEDERER UND TANNER, 1966]. Die Gründe hierfür liegen zum einen darin, dass es für viele Fragestellungen ausreicht, die Größe Strahlung in kleiner zeitlicher Auflösung als integralen Wert zu erhalten. Zum anderen mangelt es an standardisierten Messgeräten zur spektralen Erfassung der einzelnen Strahlungskomponenten. Die Messung kann meist nur mit teuren Spektroradiometern erfolgen, die eine hohe räumliche Auflösung aus Kostengründen ausschließen. KAUFMANN UND HARTMANN [1989] haben beispielsweise ein kostengünstiges Spektroradiometer zur spektralen Messung in der Aktionsspektrometrie vorgestellt. Die meisten Untersuchungen, die sich in der Agrar- und Forstmeteorologie mit spektral höher aufgelösten Messungen oder der Betrachtung des R/FR befassen, benutzen ein tragbares Spektroradiometer (z.B. LI-1800, LI-COR Inc. Lincoln, Nebraska) [COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ENDLER, 1993, OLESEN, 1992, LEE, 1989, MESSIER UND BELLEFLEUR, 1988] oder R/FR-Sensoren (z.B. SKR 110, SKYE Instruments, Powys, UK) [CAPERS UND CHAZDON, 2004, MURAOKA ET AL., 2001, AMMER, 2000] Die Ergebnisse dieser spektralen Messungen sind vielfältig und werden im Zusammenhang mit den erhobenen Daten dieser Arbeit in Kap. 3.3 diskutiert.

Die Modellierung der Größe Strahlung in einem Pflanzenbestand wurde bereits von zahlreichen Autoren mittels einer Vielzahl unterschiedlicher Lösungsansätze untersucht, die im Folgenden geschildert werden. Einen ersten Schritt zur theoretischen Beschreibung des Strahlungsfeldes in Beständen stellt das Lichtmodell von MONSI UND SAEKI [1953] dar, welches das BEER-BOUGER-LAMBERT-Gesetz auf einen Pflanzenbestand anwendet. Dabei besteht eine der Hauptannahmen in der Proportionalität zwischen dem Volumen und der sich darin befindlichen Anzahl der streuenden Objekte (z.B. Blätter). Aus der Information über die räumliche Verteilung solcher Volumina können zahlreiche unterschiedliche Modelle zur Beschreibung des Strahlungsfeldes in Pflanzenbeständen abgeleitet werden [KNYAZIKHIN ET AL., 1998].

Einen weiteren Ansatz stellt die Betrachtung des Bestandes als trübes Medium mit heterogenen dreidimensionalen Strukturen aus Wachstumsmodellen dar [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994, ROSS, 1981]. In geometrisch-optischen Modellen wird der Bestand durch geometrische Objekte wie beispielsweise Kegel, Zylinder, Kugeln und Ellipsoide beschrieben [COURBAUD ET AL., 2003, BARTELINK, 1998, BRUNNER, 1998, PUKKALA ET AL., 1993, 1991, SZWARCBAUM UND SHAVIV, 1976, BROWN UND PANDOLFO, 1969]. Andere Modelle setzen den Bestand aus homogenen Schichten zusammen [SINOQUET ET AL., 2000, CESCATTI, 1997a, OKER-BLOM ET AL., 1991a, WANG UND JARVIS, 1990, FEDERER, 1971]. Hybrid-Modelle kombinieren Eigenschaften aus den vorangegangenen Betrachtungsweisen [STADT UND LIEFFERS, 2000] und beziehen einige strukturelle Eigenschaften der Baumorganisation mit ein [OKER-BLOM ET AL., 1991b, STENBERG, 1995]. Ein kybernetisches Licht-Biomasse-Modell wurde von HENDRICH [2000] entwickelt. Für eine kleinräumigere Betrachtung, bei der das BEER-BOUGER-LAMBERT-Gesetz nicht mehr ohne weiteres gültig ist, eröffnet die Einbeziehung fraktaler Dimensionen weitere Möglichkeiten [KNYAZIKHIN ET AL., 1998]. Dieser Ansatz geht von einer Nicht-Linearität der Beziehung zwischen dem Volumen und der sich darin befindlichen Biomasseelemente aus.

Einen Überblick über die theoretischen Aspekte und verschiedene Modellansätze bieten unter anderem die Studien von BRUNNER [1998], KNYAZIKHIN UND MARSHAK [1991], MYNENI UND ROSS [1991], MYNENI ET AL. [1989], ROSS [1981], LEMEUR ET AL. [1979a] und LEMEUR UND BLAD [1974]. Die Weiterentwicklung der modellhaften Simulation des Transports und der Interaktion elektromagnetischer Strahlung im heterogenen dreidimensionalen Bestand kann beispielsweise in den Arbeiten von SINOQUET ET AL. [2000], DE CASTRO UND FETCHER [1998], KIMES [1991], MYNENI [1991] und MYNENI ET AL. [1986a, 1986b] betrachtet werden.

Der größte Teil der geschilderten Modellansätze konzentriert sich auf den PAR-Bereich. Allerdings erfolgt eine spektrale Betrachtung innerhalb dieses Bereichs nur bei wenigen Modellen [COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ANISIMOV UND FUKSHANSKY, 1997, ANISIMOV UND FUKSHANSKY, 1993, SINOQUET UND BON-

HOMME, 1992, LEMEUR UND ROSENBERG, 1979]. In den meisten Fällen wird über den gesamten Wellenbereich integriert.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende Charakterisierung der spektralen Strahlungsverteilung in einem mitteleuropäischen Mischbestand. Es sollen Lösungsansätze einiger in der Literatur aufgeworfener Fragestellungen sowohl im Bezug auf Strahlungsmessung als auch auf Strahlungsmodellierung aufgezeigt und miteinander verknüpft werden.

Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Konzipierung und der Aufbau eines neuartigen Vielkanalmesssystems im Bestand mit hoher räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten integrativ messenden Planarsensoren wird die für ökologische Systeme zu bevorzugende, aber selten angewandte Variante der spektralen Strahlungsmessung mit sphärischen Sensoren durchgeführt. Die Richtungscharakteristika der neuentwickelten Sensoren müssen bestimmt und mit herkömmlichen Messmethoden unter kontrollierten als auch unter Freilandbedingungen verglichen werden. Anhand der erhobenen Messdaten sollen neue Erkenntnisse über die spektrale Zusammensetzung der solaren Strahlung im Bestand unter unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen und phänologischen Stadien abgeleitet werden. Hierbei sollen in erster Linie die für Photosynthese und Photomorphogenese maßgeblichen Spektralbereiche betrachtet werden.

In einem zweiten Teil soll ein für Fichten-Reinbestände entwickeltes Strahlungstransportmodell an den Mischbestand angepasst und um eine spektrale Komponente erweitert werden. In das auf den photosynthetisch aktiven Strahlungsbereich beschränkte Modell soll weiterhin ein Modul zur Ermittlung der photomorphogenetisch relevanten Strahlung implementiert werden. Die notwendige Validierung der Modellergebnisse soll anhand der hochaufgelösten Messdaten erfolgen.

1.4 Standortbeschreibung der Versuchsfläche Kranzberger Forst

Der Versuchsbestand Kranzberger Forst ($11^{\circ} 39' 41''$ ö. L. / $48^{\circ} 25' 08''$ n. B.) liegt etwa 6 km westlich der Stadt Freising und 35 km nordöstlich von München und ist Teil der Wuchsreihe FRE 813 aus Fichten-Buchen-Mischbeständen im Bayerischen Forstamt Freising. Die Parzelle befindet sich im Wuchsbezirk „Oberbayerisches Tertiärhügelland 12.8“ und liegt leicht nach Norden exponiert bei einer Hangneigung von $1,8^{\circ}$ auf 490 m ü. NN [PRETZSCH ET AL., 1998]. Die Flächengröße beträgt in der Horizontalprojektion 5017 m^2 bei einer Ausdehnung von ca. $50 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Das Alter der Fichten beläuft sich auf 55 Jahre, das der Buchen auf 62 bzw. 70 Jahre. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme liegt im Bereich 730 mm – 790 mm,



Abbildung 1: Aufnahme der Intensivmessfläche im Kranzberger Forst vom Kran. Die Buchengruppe (innerhalb der Gerüsttürme) ist von den Fichten umschlossen. Drei der vier Türme sind in vier Ebenen mit einem Gerüst verbunden.

die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt $7,0^{\circ}\text{C} - 7,5^{\circ}\text{C}$ [HÄBERLE ET AL., 2003]. Die beiden vorherrschenden Bodentypen sind eine Pseudogley-Parabraunerde aus Löss über Molasse sowie ein podsolierter Pseudogley aus Löss mit der wasserstauenden Schicht unterhalb 30 cm.

In dem Versuchsbestand werden zahlreiche Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 607 und weiterer nationaler und internationaler Arbeitsgruppen in den Bereichen Klimatologie, molekulare Biologie, Biochemie, Ökophysiologie, Pflanzenernährung, Mykologie, Phytopathologie, Zoologie, Bodenkunde, Forstwissenschaft, Luftchemie und Modellierung durchgeführt. In der Parzelle wurde eine Intensivmessfläche von ca. 1200 m^2 ausgewiesen, auf der die meisten dieser Untersuchungen stattfinden. Innerhalb dieser ausgewiesenen Teilfläche befinden sich vier Gerüsttürme mit Höhen zwischen 27 m und 35 m, von denen drei miteinander in vier Ebenen (17 m, 19 m, 21 m, 23 m) verbunden sind. Darüber hinaus ermöglicht ein im Jahr 2000 installierter Kran den erweiterten Zugang zum Kronenraum der Untersuchungsfläche. Der Bestand ist waldwachstumskundlich gut charakterisiert [PRETZSCH ET AL., 1998]. REITER [2004] ermittelte sowohl für Buche als auch für Fichte auf Bestandesebene einen projizierten Blattflächenindex von etwa sechs.

Abb. 1 zeigt die Versuchsfläche vom Kran aus betrachtet. Die von den Fichten umschlossene Buchengruppe liegt zwischen den Gerüsttürmen und ist deutlich an den unterschiedlichen Kronenformen zu erkennen. Die Aufnahme erfolgte nach dem Laubfall der Buche.

2 Physikalische und biologische Grundlagen

Der wichtigste Prozess des Energietransfers in der Atmosphäre ist die elektromagnetische Strahlung. Ihre Fortbewegungsart ist wellenförmig. Alle elektromagnetischen Wellen verzeichnen die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Vakuum. Diese Fortbewegungsgeschwindigkeit, auch Lichtgeschwindigkeit c genannt, hat einen konstanten Wert von $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ [PTB, 2004]. In Materie, z.B. Luft, beträgt sie geringfügig weniger. Die unterschiedlichen elektromagnetischen Wellen werden charakterisiert durch ihre Wellenlänge λ oder ihre Frequenz $\tilde{\nu}$. Die Umrechnung zwischen beiden Größen erfolgt nach der Formel:

$$\lambda = \frac{c}{\tilde{\nu}}. \quad (1)$$

Die elektromagnetischen Wellen reichen von extrem kurzen ($< 10^{-15} \text{ m}$) bis hin zu extrem großen Wellenlängen ($> 10^8 \text{ m}$) bzw. von extrem hohen zu extrem niedrigen Frequenzen. Der für das menschliche Auge sichtbare Wellenbereich (Licht) nimmt lediglich einen kleinen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums ein. Er erstreckt sich von Violett bei knapp 390 nm ($7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) über Blau, Grün, Gelb, Orange, Rot bis Dunkelrot bei etwa 780 nm ($4,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) [KUCHLING, 1999].

Im Anschluss an den kurzwelligen Bereich der sichtbaren Strahlung folgt die Ultraviolett-Strahlung, aufgeteilt in die drei Bereiche UV-A ($320 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$), UV-B ($290 \text{ nm} - 320 \text{ nm}$) und UV-C ($100 \text{ nm} - 290 \text{ nm}$). An den Bereich der ultravioletten Strahlung schließt sich die Röntgenstrahlung an, auf diese folgt die Gammastrahlung. Die kürzesten Wellenlängen werden von der kosmischen Strahlung eingenommen. Im längerwelligen Bereich folgt auf Wellenlängen größer 780 nm die Infrarot-Strahlung, beginnend mit dem nahen Infrarot bis etwa 1000 nm . An den Infrarot-Bereich schließen sich die Mikrowellen, die Radar-, Fernseh-, Radiowellen, die Niederfrequenzen und letztendlich Wellen, die für technische Wechselströme Verwendung finden, an. Die Grenzen aller Spektralbereiche sind jedoch relativ unscharf.

Bereits im Jahre 1690 ordnete der niederländische Physiker HUYGENS in Anlehnung an Schallwellen dem Licht eine Wellennatur zu. Diese Theorie wurde durch FRESNEL und YOUNG weitergeführt, indem Licht als transversale Welle in einem schwingenden, elastischen Medium bezeichnet wurde. Heute weiß man, dass longitudinale Wellen und Schallwellen an das Vorhandensein von Materie gebunden sind, Licht sich jedoch auch im Vakuum ausbreiten kann. Im 19. Jahrhundert untermauerten die Theorien des Physikers MAXWELL die Annahme, dass sich Licht als elektromagnetische Welle fortbewegt. Nach der Theorie von MAXWELL erfolgt die Ausbreitung der Wellen durch ein rasches Abwechseln von elektrischen und magnetischen Feldern. Diese erzeugen sich gegenseitig und sind zueinander senkrecht gerichtet. Dabei wird die Schwingungsebene des magnetischen Vektors als Polarisationssebene, die darauf senkrecht stehende Ebene des elektrischen Vektors als Schwingungsebene definiert. Die Entstehung elektromagnetischer Felder ist auf Schwingungen von Atomen und Molekülen zurückzuführen. Dabei werden keine kontinuierlichen Wellen, sondern

Wellenpakete, die aus mehreren Schwingungen bestehen, abgegeben. Das sichtbare Licht ist ein Bündel unterschiedlich polarisierter Wellenpakete, da die Schwingungsebenen der Wellenzüge, ausgehend von unterschiedlichen Molekülen, nicht parallel verlaufen. Die Strahlung einer Wellenlänge wird als monochromatisch bezeichnet, meist versteht man unter diesem Begriff jedoch einen engen Wellenlängenbereich (oft 10 nm).

Durch die oben beschriebene Wellennatur können viele Eigenschaften des Lichts wie Beugung, Brechung, Interferenz und räumliche Ausbreitung beschrieben werden. Betrachtet man jedoch das elektrische Verhalten eines Photomultipliers bei der Einstrahlung sehr geringer Bestrahlungsstärken, kann eine statistische Folge von Einzelimpulsen beobachtet werden. Dieser Effekt lässt sich nur durch das Auftreffen von distinkten Partikeln, sogenannten Photonen, erklären. Bereits im Jahr 1675 wurde die Emissionstheorie von NEWTON vertreten, wonach Strahlung aus kleinen Teilchen besteht, die von einer Quelle emittiert werden und durchsichtige Körper durchdringen können. Elektromagnetischer Strahlung kann man aus diesem Grund sowohl Wellen- als auch Teilchennatur zuschreiben. Diese dualistische Strahlungstheorie wurde von PLANCK, EINSTEIN und DE BROGLIE Anfang des 20. Jahrhunderts begründet. Photonen werden als virtuelle Partikel bezeichnet, da sie im Gegensatz zu Hadronen (Neutronen und Protonen) oder Elektronen keine Ruhemasse aufweisen, jedoch eine bestimmte Energie besitzen. PLANCK zeigte, dass Licht aus distinkten Portionen bestimmter Energie, den Quanten, besteht. Diese Energie ist von der Frequenz der Strahlung und damit auch von der Wellenlänge abhängig [FRITSCHEN UND GAY, 1979]:

$$E = h \tilde{\nu} = h \frac{c}{\lambda}. \quad (2)$$

Dabei ist $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34}$ Js das PLANCKSche Wirkungsquantum [PTB, 2004]. Daraus resultiert eine umgekehrte Proportionalität der Energie eines Quants zu seiner Wellenlänge, d.h. kurzwellige Strahlung ist energiereicher als langwellige.

Der oft verwendete Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus ist aus heutiger naturwissenschaftlicher Sicht fraglich oder zumindest als sehr missverständlich anzusehen, da Photonen eindeutig Teilchen sind. Der Wellencharakter der elektromagnetischen Strahlung beschreibt vielmehr die Wahrscheinlichkeit, mit der ein einzelnes Photon die theoretisch vorhandenen Möglichkeiten wahrnimmt. Die Erklärung der komplexen Quantentheorie ist jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit und soll aus diesem Grund nicht weiter vertieft werden.

2.1 Strahlungsgrößen, Definitionen, Einheiten

In diesem Kapitel sollen alle für diese Arbeit relevanten Strahlungsgrößen definiert werden. Auf eine vollständige Aufzählung der Vielzahl an existierenden Strahlungsgrößen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit bewusst verzichtet. Die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Strahlungsgrößen sind in Tab. 1 aufgelistet.

Bei der Betrachtung der Strahlung erfolgt eine Unterscheidung zwischen strahlungsenergetischen, physiologischen (Anzahl der Photonen oder Quanten) und photometrischen Größen. Letztere beziehen sich auf den Wellenbereich des elektromagnetischen Spektrums, der vom menschlichen Auge wahrgenommen wird (380 nm–780 nm). Dieses System basiert auf dem Helligkeitsempfinden des Auges. Die maximale spektrale Empfindlichkeit des helladaptierten Durchschnittsauges liegt im Grünbereich bei 555 nm. Die SI-Basiseinheit (Système International d’Unités) für die Lichtstärke ist die Candela [cd], von der alle anderen strahlungsrelevanten Größen abgeleitet wurden. Sie ist definiert als die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung (1/683) Watt durch Steradian beträgt [PTB, 2004].

Zu jeder photometrischen Größe gibt es ein strahlungsenergetisches und ein physiologisches Äquivalent. Die von einer Strahlungsquelle abgestrahlte Photonenmenge, die pro Zeiteinheit auf eine Einheitsfläche trifft, wird im Bereich der photosynthetisch relevanten Wellenlängen in der Pflanzenphysiologie als photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD) in $[\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ definiert. Aus praktischen Gründen wird als Einheit $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ oder $[\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ (mit $1 \text{ E} = 1 \text{ Einstein} = 1 \text{ mol Photonen} = 6,0221415 \cdot 10^{23} = N_A$, AVOGADRO-Konstante) verwendet [PTB, 2004, DOHRENBUSCH, 1995]. Ist der Rezeptor keine Einheitsfläche, sondern eine sphärische Oberfläche, dann wird die auf dem Rezeptor auftreffende Strahlung aus dem gesamten Raumwinkel Ω als Raumphotonenfluss oder Photonenflussrate (PFR) in $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ bezeichnet (in der englischsprachigen Literatur: photon fluence rate [BJÖRN UND VOGELMANN, 1994]). Der photosynthetisch aktive Bereich ist daher die photosynthetische PFR (PPFR). Jedes Photon besitzt in Abhängigkeit von der Wellenlänge eine bestimmte Energie. Die Energiemenge, die pro Zeiteinheit auf eine Einheitsfläche trifft, wird als Bestrahlungsstärke oder Intensität I in $[\text{W m}^{-2}]$ oder $[\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}]$ bezeichnet [PTB, 2005, GERTHSEN ET AL., 1974].

Die Umrechnung zwischen strahlungsenergetischen Größen (Intensität) und der Photonenzahl P erfolgt über folgende wellenlängenabhängige Gleichung:

$$P_\lambda = I_\lambda \frac{\lambda}{h c N_A} 10^{-3}. \quad (3)$$

Bei einer Wellenlänge von 500 nm entspricht 1 mol Photonen einer Energie von $2,39 \cdot 10^5 \text{ J}$.

Nach der Betrachtung der generellen Strahlungsgrößen, ist eine Definition einiger solarer Strahlungskomponenten unumgänglich. Für den Bereich oberhalb der terrestrischen Atmosphäre ergibt sich für eine zur einfallenden Strahlung senkrechten Fläche eine von der Erdposition abhängige Bestrahlungsstärke innerhalb der Spanne von $1310 \text{ W m}^{-2} - 1400 \text{ W m}^{-2}$, die sogenannte Solarkonstante I_0 [HÄCKEL, 1985]. Die nach Durchdringen der Atmosphäre (siehe Kap. 2.2) auf einer zur Erdoberfläche parallelen Einheitsfläche eintreffende kurzwellige Strahlung wird als Globalstrahlung

Strahlungsgröße	Formelzeichen	Einheit
Raumphotonenfluss / Photonenflussrate (PFR)	ϕ	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
photosynthetische Photonenflussrate (PPFR)	ϕ_p	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD)	ϕ_d	$[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
Bestrahlungsstärke / Strahlungsintensität	I	$[\text{W m}^{-2}]$

Tabelle 1: Wichtige Strahlungsgrößen

I_S bezeichnet. Diese kann in ihre zwei Hauptkomponenten aufgeteilt werden. Dabei wird der Anteil der Globalstrahlung, der von der Sonne direkt, also ohne Wechselwirkung mit der Atmosphäre, zur Erdoberfläche gelangt, als direkte Strahlung I_D , der in der Atmosphäre gestreute Anteil als diffuse Strahlung oder Himmelsstrahlung I_H bezeichnet. Tab. 2 listet die wichtigsten Komponenten der solaren Strahlung auf.

Für die Photosynthese grüner Pflanzen ist in erster Linie der Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm von Bedeutung. Diesen Anteil bezeichnet man als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) I_p . Der für die Photomorphogenese verantwortliche Wellenlängenbereich 350 nm – 800 nm (in einigen Fällen auch 400 nm – 800 nm) wird als morphogenetisch aktive Strahlung (MAR) I_m definiert [COMBES ET AL., 2000, VARLET-GRANCHER ET AL., 1993]. Er umfasst die Spektralbereiche mit den Absorptionsmaxima der morphogenetisch wichtigsten Photorezeptoren.

Innerhalb dieses Bereichs spielen vor allem das Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis (R/FR) ζ eine große Rolle. Es ist definiert als das Verhältnis der PFR von 655 nm – 665 nm und der PFR von 725 nm – 735 nm [MONTEITH, 1976]:

$$\zeta = \frac{\int_{655}^{665} \phi_\lambda}{\int_{725}^{735} \phi_\lambda} d\lambda \quad (4)$$

In vielen betrachteten Fällen erfolgt eine Unterscheidung nach den meteorologischen Rahmenbedingungen, insbesondere dem Bewölkungsgrad. Es werden hauptsächlich die beiden Extremfälle betrachtet. Die wolkenlose Situation wird dabei als CS- (clear sky), die vollständig bewölkte als OVC- Bedingung (overcast sky) bezeichnet.

Komponente	Formelzeichen	Spektralbereich
Solarkonstante	I_0	200 nm – 3000 nm
Globalstrahlung	I_S	300 nm – 3000 nm
direkte Strahlung	I_D	300 nm – 3000 nm
diffuse Strahlung / Himmelsstrahlung	I_H	300 nm – 3000 nm
photosynthetisch aktive Strahlung (PAR)	I_p	400 nm – 700 nm
morphogenetisch aktive Strahlung (MAR)	I_m	350 nm – 800 nm

Tabelle 2: Komponenten der solaren Strahlung

2.2 Die solare Strahlung und ihre spektralen Eigenschaften

Ein kurzer Exkurs zu Beginn des Kapitels betrachtet grundlegende Strahlungsgesetzmäßigkeiten, um die spektrale Zusammensetzung der solaren Strahlung auf der Erdoberfläche erklären zu können.

Jeder Körper emittiert Strahlung. Bei gegebener Temperatur T und Wellenlänge λ gilt unter Voraussetzung eines thermodynamischen Gleichgewichts für alle Körper das KIRCHHOFFSche Strahlungsgesetz

$$\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T}, \quad (5)$$

bei dem $\epsilon_{\lambda T}$ der Emissionsgrad und $\alpha_{\lambda T}$ der wellenlängen- und temperaturabhängige Absorptionsgrad ist.

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers kann als Funktion von Temperatur und Wellenlänge beschrieben werden. Sie ist abgebildet im Strahlungsgesetz von PLANCK. Ist h das PLANCKsche Wirkungsquantum und $K = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ (BOLTZMANN-Konstante), dann gilt für die PLANCKsche Funktion

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda(e^{\frac{hc}{K\lambda T}} - 1)}. \quad (6)$$

Durch Integration über den gesamten Wellenlängenbereich erhält man die gesamte Strahlungsleistung ϕ_e . Diese ist proportional zur abstrahlenden Oberfläche A und zur 4. Potenz der Körpertemperatur T . Ist $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ die Strahlungskonstante (STEFAN-BOLTZMANN-Konstante) [PTB, 2004] und gilt für einen

nicht-schwarzen Körper der Emissionsgrad ϵ , dann gilt das Strahlungsgesetz von STEFAN UND BOLTZMANN [HÄCKEL, 1985]

$$\phi_e = \sigma \epsilon AT^4. \quad (7)$$

Die Wellenlänge des Maximums der emittierten Strahlungsintensität λ_{max} ist umgekehrt proportional zur Temperatur (WIENSches Verschiebungsgesetz) [HÄCKEL, 1985]. Durch Nullsetzen der 1. Ableitung der PLANCKschen Funktion im Hinblick auf die Wellenlänge erhält man daher

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T}, \quad (8)$$

mit der Konstanten $a = 2880 \mu\text{mK}$, d.h. mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Maximum der abgestrahlten Strahlungsintensität ins Kürzerwellige.

2.2.1 Das solare Spektrum

Praktisch die gesamte Energie, die die Erde erhält und die Atmosphäre antreibt, stammt von der Sonne. Die Sonnenenergie wird durch stetige Kernfusionsreaktionen von vier Wasserstoffatomen zu einem Heliumatom generiert. Dieser Vorgang findet im Sonneninnern bei Temperaturen von mehreren Millionen Kelvin statt. Mit steilem Gradient nimmt die Temperatur bis hin zur Sonnenoberfläche ab, an der sie etwa 5800 K beträgt. Wie in den Strahlungsgesetzen im vorherigen Kapitel beschrieben wird, ist diese Oberflächentemperatur für die abgestrahlte Energiemenge sowie für deren spektrale Zusammensetzung verantwortlich. Die spektrale Strahlungsverteilung der Sonne entspricht am oberen Rand der Atmosphäre ziemlich gut der theoretischen Schwarzkörperstrahlung bei 6000 K für sichtbare und infrarote, bei knapp 5000 K für die ultraviolette Strahlung. Annäherungsweise 50 % dieser von der Sonne emittierten elektromagnetischen Energie liegt im Infrarot-Bereich, 40 % im Bereich sichtbarer Wellenlängen und 10 % im Ultraviolett. Das Maximum der solaren Strahlung befindet sich aufgrund der Oberflächentemperatur der Sonne im sichtbaren Bereich bei etwa 480 nm [LIOU, 1980]. In den folgenden Kapiteln sollen in erster Linie die spektralen Modifikationen der solaren Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre und bei der Wechselwirkung mit Vegetation betrachtet werden.

2.2.2 Einfluss der Atmosphäre auf die spektrale Zusammensetzung

Bei den wichtigsten Interaktionsprozessen der Atmosphäre auf die eintreffende solare Strahlung handelt es sich um Absorptions- und Streuvorgänge durch Gase und Aerosole. Beim Durchdringen der solaren Strahlung durch die Erdatmosphäre wirken sich diese Vorgänge durch eine Veränderung der zeitlichen und räumlichen Verteilung

der Energiemengen sowohl quantitativ als auch qualitativ durch die wellenlängen-selektive Beeinflussung der atmosphärischen Gase aus, d.h. gewisse Wellenlängen werden herausgefiltert, andere transmittiert [HÄCKEL, 1985]. Daraus entsteht die typische spektrale Zusammensetzung der solaren Strahlung an der Erdoberfläche. Im Folgenden soll nun näher auf das Zustandekommen dieser spektralen Veränderung eingegangen werden.

Der Großteil des Licht, der das menschliche Auge erreicht, kommt nicht direkt von der Strahlungsquelle, sondern indirekt durch den Vorgang der Streuung oder diffusen Reflexion. Einige Beispiele sind der blaue Himmel, weiße Wolken und der Regenbogen. Streuung ist ein fundamentaler physikalischer Prozess in Verbindung mit Licht und seiner Wechselwirkung mit Materie. Streuung kann in sämtlichen Wellenlängen über das gesamte elektromagnetische Spektrum beobachtet werden. Grundsätzlich ist Streuung ein physikalischer Vorgang, bei dem ein Partikel einer elektromagnetischen Welle beim Auftreffen Energie entzieht und in alle Raumrichtungen wieder abgibt [LIOU, 1980]. In der Atmosphäre kann ein solcher Partikel ein Gasmolekül mit sehr geringem Durchmesser ($< 10^{-8}$ cm) bis hin zu einem großen Regentropfen oder Hagelkorn (> 1 cm) sein. Die relative Intensität des Streuungsmusters hängt dabei wesentlich von dem Verhältnis der Partikelgröße zur Wellenlänge der eintreffenden Welle zusammen. Liegt isotropische Streuung vor, ist das räumliche Verteilungsmuster symmetrisch zur Richtung der Welle. Kleine anisotropische Partikel streuen die Energie annähernd gleichmäßig in die vordere und hintere Richtung. Werden die Partikel größer, überwiegt die Vorwärtsstreuung. Ebenfalls erfolgt eine Zunahme der Komplexität mit zunehmender Partikelgröße. Sind die Partikel wesentlich kleiner als die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung, erfolgt eine wellenlängenselektive Streuung, die sogenannte RAYLEIGH-Streuung. Diese ist u.a. für die blaue Farbe des Himmels und die Himmelpolarisation verantwortlich, da der Anteil der gestreuten Strahlung im kurzwelligen (in diesem Fall Blau) weit höher als im langwelligen Bereich ist. Dies geht aus dem Gesetz von RAYLEIGH hervor, da die Intensität der gestreuten Strahlung umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge ist. Besitzen die Partikel etwa die gleiche Größe oder übertreffen sogar die Wellenlänge, bezeichnet man diesen Typ MIE-Streuung. Diese Art ist wellenlängenunabhängig und gilt somit für alle Wellenlängen gleichermaßen. Wird eine Welle mehr als einmal gestreut, spricht man von Mehrfachstreuung. Neben der diffusen Reflexion in alle Raumrichtungen tritt in der Natur auch das Phänomen der spiegelnden Reflexion an glatten Oberflächen auf, bei der die gesamte auftreffende Strahlung reflektiert wird und laut Reflexionsgesetz der Einfallswinkel dem Reflexionswinkel entspricht [GERTHSEN ET AL., 1974].

Streuung steht meist in enger Verbindung mit Absorption. Dabei kann man Absorption als jene Wechselwirkung von Strahlung und Materie definieren, bei der Strahlungsenergie von der Materie aufgenommen und in eine andere Energieform, insbesondere Wärme, umgewandelt wird. Wird ein Elektron von einem Photon getroffen, so versetzt die aufgenommene Energie das Elektron in einen angeregten Energiezustand. Das Elektron bewegt sich nun in einem energiereicheren Orbit mit

größerem Radius um den Atomkern. In diesem angeregten Zustand emittiert das Elektron spontan und zufällig die aufgenommene Energie, um laut dem ersten Gesetz der Thermodynamik in seinem Streben nach minimaler Enthalpie (Energieinhalt) erneut in den energieärmeren Grundzustand zu gelangen.

So können z.B. Moleküle mit Hilfe der aufgenommenen Energie gespalten werden. Dies geschieht beispielsweise in der Ozonschicht, in der Ozon (O_3) durch Strahlung mit Wellenlängen kleiner als $1,134\ \mu\text{m}$ in zwei- (O_2) und einatomigen Sauerstoff (O) aufgespalten wird. Das Absorptionsvermögen eines Körpers entscheidet über seine Farbe.

Tritt Strahlung durch ein absorbierendes Medium wie z.B. die Atmosphäre oder eine Baumkrone [MITSCHERLICH, 1981] und werden dabei Streu- und Ausstrahlungsbeiträge vernachlässigt, so gilt unter der Annahme eines homogenen Mediums für den wellenlängenabhängigen Energieverlust das BEER-BOUGER-LAMBERT-Gesetz

$$I_\lambda(s_1) = I_\lambda(0) e^{-k_\lambda u}, \quad (9)$$

bei dem u die Schichtdicke, $I_\lambda(0)$ die Strahlungsintensität vor, $I_\lambda(s_1)$ die Strahlungsintensität nach Durchqueren des Mediums und k_λ der Absorptionskoeffizient ist [LIOU, 1980, ANDERSON, 1971, DIRMHIRN, 1964]. Der monochromatische Transmissionsgrad τ_λ kann daher definiert werden als

$$\tau_\lambda = \frac{I_\lambda(s_1)}{I_\lambda(0)} = e^{-k_\lambda u}. \quad (10)$$

Für ein nichtstreuendes Medium ist daher der monochromatische Absorptionsgrad α_λ , also der absorbierte Anteil der einfallenden Strahlung, gegeben durch

$$\alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda u}. \quad (11)$$

Fügt man nun die Streuung hinzu, ergibt sich ein Reflexionsanteil, der zu der Strahlung addiert werden muss. Aus diesem Grund definiert man den monochromatischen Reflexionsgrad ρ_λ als Verhältnis von reflektierter zu eingestrahelter Intensität. Nach dem Prinzip der Energieerhaltung ergibt sich daher

$$\tau_\lambda + \alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (12)$$

für den Strahlungstransfer durch ein streuendes, absorbierendes Medium [KUCHLING, 1999, LIOU, 1980].

Absorption erfolgt bei materialspezifischen Wellenlängen, den sogenannten Absorptionsbanden. Jedes Gas der Atmosphäre hat seine charakteristischen Absorptionsbanden. So sind es im Wesentlichen die drei Gase Ozon (O_3), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O), insgesamt jedoch eine Vielzahl von weiteren Gasen wie z.B. molekularer Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2), atomarer Stickstoff (N) und Sauerstoff (O), Lachgas (N_2O), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4), die im

Spektrum des Sonnenlichts absorbieren. Es kann aufgrund ihrer Vielzahl nicht auf sämtliche Absorptionsbanden eingegangen werden, die wichtigsten sollen aber genannt werden. Im UV-Bereich sind das vor allem die Absorptionsspektren von O_3 , O_2 , O , N_2 und N . Wichtige Absorptionsbereiche von O_2 sind hierbei das SCHUMANN-RUNGE-Bandensystem und Kontinuum im Bereich 125 nm bis 200 nm sowie die starken HOPFIELD-Banden bei Wellenlängen < 100 nm. Der Bereich zwischen 200 nm und 300 nm wird fast ausschließlich von O_3 , den sogenannten HARTLEY-Banden, absorbiert. Ebenfalls zeichnet sich O_3 für die Absorption von 300 nm bis 360 nm durch die HUGGINS-Banden aus. Weitere relativ schwache Absorptionsbanden des Ozons im sichtbaren Spektrum zwischen 440 nm und 1180 nm werden als CHAPPUIS-Banden bezeichnet [LIOU, 1980].

Molekularer Sauerstoff besitzt auch schwache Banden im sichtbaren, in erster Linie roten Bereich. Die sogenannte A-Bande von O_2 bei einer Wellenlänge von ca. 760 nm ist aufgrund ihrer Rolle bei der Entdeckung der Isotope ^{18}O und ^{17}O eine der bekanntesten. Diese Bande ist auch in allen gemessenen Spektren dieser Arbeit sehr ausgeprägt zu beobachten. Im nahen Infrarot sind die Absorptionsbanden vor allem auf schwingende und rotierende Übergänge zurückzuführen. Dabei ist der wichtigste Absorber der Wasserdampf, gefolgt von Kohlendioxid. Die Zentren der wichtigsten H_2O -Banden liegen bei den Wellenlängen 940 nm, 1100 nm, 1380 nm, 1870 nm, 2700 nm und 3200 nm. CO_2 besitzt seinerseits eine Reihe schwacher Absorptionsbanden bei 1400 nm, 1600 nm, 2000 nm und mit H_2O überlappend bei 2700 nm eine etwas stärkere Absorptionsfähigkeit. Sowohl Wasserdampf als auch Kohlendioxid besitzen des Weiteren Banden im thermalen Infrarot. Da diese Wellenbereiche jedoch sehr wenig solare Energie beinhalten, soll nicht näher auf sie eingegangen werden.

2.2.3 Spektrale Zusammensetzung im Bestand

Ähnlich den Prozessen in der Atmosphäre treten auch an Blättern, Stämmen und sonstigen Organen der grünen Pflanzen Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseffekte auf. Diese sind spektral selektiv und variieren zwischen den einzelnen Pflanzenarten je nach spektralem Absorptionkoeffizient zum Teil erheblich. Man kann die Interaktion zwischen Sonnenstrahlung und lebenden Pflanzen in drei unterschiedliche Kategorien einteilen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Die erste Kategorie bilden thermische Effekte, anhand derer über 70% der durch Pflanzen absorbierten solaren Einstrahlung in Wärme umgewandelt und als Energie für Transpiration, Aufrechterhaltung der pflanzlichen Temperatur und andere Vorgänge genutzt werden [ROSS, 1981]. Eine zweite Komponente im Hinblick auf die Wechselwirkungen Pflanze – Strahlung bilden photomorphogenetische Effekte bezüglich Wachstum und Entwicklung, die bereits im Kap. 1.2 angedeutet wurden. Hinsichtlich der Pflanzenmorphogenese spielen zwei Arten von Photorezeptoren die entscheidenden Rollen. Es handelt sich hierbei um UV-A- und Blaulichtrezeptoren im Bereich 350 nm – 500 nm sowie Phytochrome [VARLET-GRANCHER ET AL.,

1993, MORGAN UND SMITH, 1981]. Letztere existieren in zwei interkonvertiblen Formen P_r mit einem Band maximaler Absorption im Hellrot-Bereich um 660 nm und P_{fr} mit maximaler Absorption im Dunkelrot-Bereich um 730 nm. Die Aktionsspektren der beiden Formen überlappen sich im gesamten Bereich von 400 nm – 800 nm. Die reversible Photokonversion zwischen beiden Formen ist der grundlegende Prozess der Lichtwahrnehmung der Phytochrome. Abhängig von der spektralen Zusammensetzung der Strahlung stellt sich ein Gleichgewicht zwischen beiden Formen ein. Dieses wird als Phytochrom Photoequilibrium Φ_c bezeichnet [SMITH UND HOLMES, 1977] und berechnet sich nach

$$\Phi_c = \frac{[P_{fr}]}{[P_r] + [P_{fr}]} = \frac{\int_{400}^{800} \phi_\lambda A_{r\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} \phi_\lambda A_{fr\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \phi_\lambda A_{r\lambda} d\lambda}, \quad (13)$$

wobei $A_{fr\lambda}$ bzw. $A_{r\lambda}$ die Aktionsspektren der beiden Phytochromformen P_{fr} bzw. P_r sind. Aufgrund der Absorptionsmaxima der Phytochrome bei 660 nm und 730 nm ist das Phytochrom Photoequilibrium stark mit dem R/FR korreliert [SMITH, 1982, HOLMES, 1981, MORGAN, 1981]. Neben der spektralen Zusammensetzung und dem Energieinhalt spielen für die Photomorphogenese auch zahlreiche weitere Faktoren wie z.B. die periodisch-zeitliche Variabilität der Strahlung in Hinblick auf Dauer und Frequenz von Hell- und Dunkelperioden eine Rolle [ROSS, 1981].

Die wahrscheinlich wichtigste Interaktion zwischen Pflanzen und Strahlung bildet die Photosynthese. Sie findet in einem Spektralbereich statt, der in etwa dem sichtbaren entspricht. Für diese PAR wurde der Bereich 400 nm – 700 nm festgelegt [BRUNNER, 1994, MCCREE, 1972]. Allerdings wird nicht die gesamte Strahlung dieses Wellenlängenabschnittes tatsächlich für die Photosynthese herangezogen, sondern nur die sogenannte photosynthetisch nutzbare Strahlung (PUR). Die tatsächlich für die Photosynthese absorbierten Anteile richten sich nach der speziellen Quantensensibilität grüner Pflanzen und liegen in erster Linie bei den blauen und roten Wellenlängen. Diese Tatsache ist verantwortlich für die grüne Farbe der Vegetation. Die PUR beträgt etwa 61% der PAR bzw. 28% der Globalstrahlung [DOHRENBUSCH, 1995, DOHRENBUSCH ET AL., 1995].

Die individuellen Absorptionscharakteristika verschiedener Pflanzen werden, wie in Abb. 2 dargestellt, von den Absorptionsspektren der Chlorophylle, Carotinoide und verschiedener anderer Chloroplastenpigmente bestimmt. Im Vergleich dazu besteht die Absorptionscharakteristik im langwelligen Bereich (> 1400 nm) hauptsächlich aus Rotations- und Vibrationsanregungen der Wassermoleküle in der Pflanze. Im nahen Infrarot zwischen 700 nm und 1400 nm dominieren Reflexion und Transmission, wohingegen das Absorptionsvermögen auf ein sehr niedriges Niveau sinkt.

2.3 Theorie der Lichtwellenleiter

Neben den physikalischen und biologischen Grundlagen der solaren Einstrahlung muss in dieser Arbeit, in der ein neuartiges Messsystem entwickelt wird, auch auf

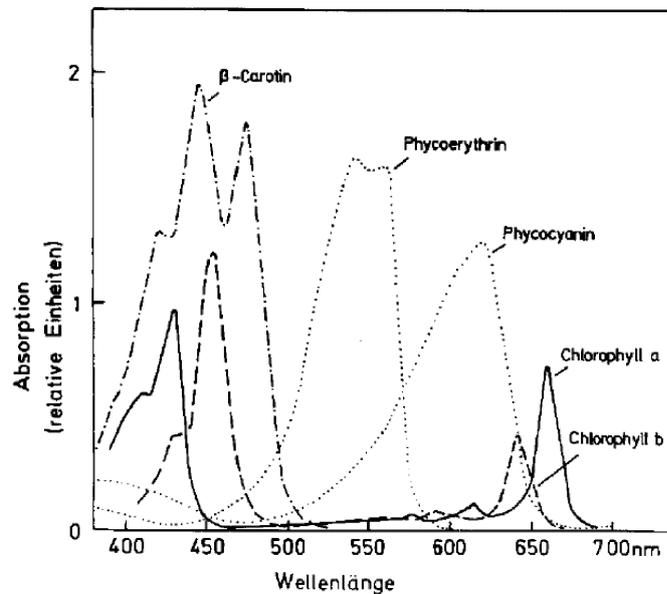


Abbildung 2: Absorptionsspektren von Chloroplastenpigmenten in Lösung [aus Renger, 1978]

physikalische Prozesse eingegangen werden, die die Messtechnik betreffen. Nachdem die Strahlungsmessung auf der faseroptischen Übertragung des Lichtes in Lichtwellenleitern (LWL) aus Quarzglas beruht, soll in einem kurzen Exkurs auf theoretische Grundlagen eingegangen werden.

Der Anwendungsbereich von LWL liegt vor allem in der Telekommunikations-, Informations- und Nachrichtentechnik. Sie dienen insbesondere zur raschen Datenübertragung mit Hilfe optischer Übertragungstechnik. Die LWL-Faser besteht aus einem Kern, einem Mantel und einer Beschichtung (siehe Abb. 3). Der lichtführende Kern mit Brechungsindex n_1 , also dem Faktor, um den die Lichtgeschwindigkeit in einem optischen Material kleiner ist als im Vakuum, dient zur Übertragung des Signals. Der Brechungsindex n_2 des Mantels ist kleiner als der des Kernbereichs ($n_2 < n_1$) [KERSTEN, 1984]. Aufgrund der unterschiedlichen Brechzahlen bewirkt der Mantel an der Grenzfläche eine Totalreflexion und somit die Führung der Strahlung im LWL-Kern. Die Beschichtung dient als Schutz vor größeren mechanischen Belastungen und besteht meist aus einer Kunststoff- oder Gewebehülle. In manchen Fällen befindet sich zwischen dem Mantel und der Beschichtung noch zusätzlich eine sehr dünne Lackierung, um atmosphärische Feuchtigkeit von der Faser fernzuhalten. Abb. 3 zeigt einen Längsschnitt durch einen typischen LWL.

Man unterteilt die LWL in Monomode- und Multimode-LWL. Erstere werden ausschließlich aus Quarzglas hergestellt (Kern und Mantel), bei letzteren gibt es verschiedene Materialkombinationen, die je nach Anwendungsgebiet eingesetzt werden können [KERSTEN, 1984]. Diese Möglichkeiten sind: Mantel und Kern aus Quarzglas, Mantel und Kern aus normalem Glas, Mantel aus Kunststoff und Kern aus Quarz-

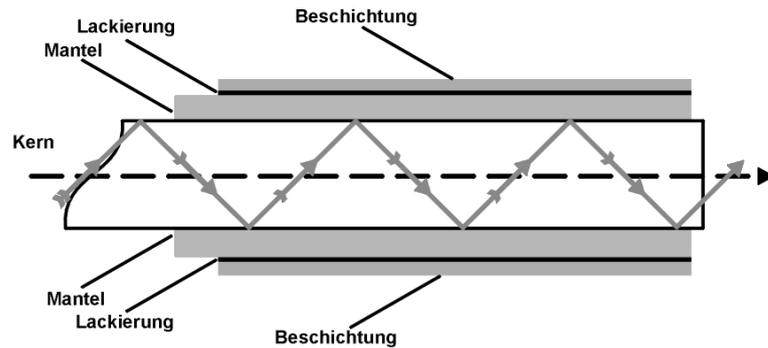


Abbildung 3: Längsschnitt durch einen Stufenindex-Lichtwellenleiter

glas sowie Mantel und Kern aus Kunststoff. Ein Monomode-LWL besteht aus einem sehr kleinen lichtführenden Kernbereich mit Durchmessern von $< 10 \mu\text{m}$. In diesem sind üblicherweise zwei zueinander senkrecht polarisierte Wellentypen (Moden) ausbreitungsfähig [KERSTEN, 1984]. Multimode-LWL sind durch wesentlich größere Kerndurchmesser ($50 - 1000 \mu\text{m}$) gekennzeichnet. Dies ermöglicht eine Ausbreitung zahlreicher Wellentypen. Formeln zur Berechnung der Gesamtzahl ausbreitungsfähiger Moden findet man z.B. bei REITMAYER [2000] und KERSTEN [1984].

Neben den LWL mit Stufenindex, bei denen die Strahlung an der Grenzfläche Mantel-Kern durch zwei unterschiedliche Brechungsindizes totalreflektiert wurde, gibt es auch noch LWL mit Gradientenindex. Hierbei handelt es sich um einen parabelförmigen Abfall der Brechzahl vom Kernzentrum zum Mantel, d.h. die Brechzahl im Faserkern ist nicht konstant. Da das Licht wellenförmig transportiert wird, ist im Vergleich zu den Stufenprofilen mit Totalreflexion eine höhere Übertragungsbandbreite möglich.

Damit der Grenzwinkel der Totalreflexion im LWL α_G nicht unterschritten wird, darf der Einfallswinkel Θ_G , auch Akzeptanzwinkel bezeichnet, für die Strahlen, die auf die LWL-Stirnfläche treffen, nicht überschritten werden [EBERLEIN, 1998]. Als Maß für die Größe des maximalen Einfallswinkels, der ein Weiterführen der Strahlung im LWL, nachdem sie auf die Stirnfläche der Faser trifft, noch ermöglicht, dient die numerische Apertur NA . Sie wird als Sinus des Einfallswinkels Θ_G definiert [REITMAYER, 2000]:

$$NA = \sin \Theta_G = n_1 \sin \alpha_G = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (14)$$

Die numerische Apertur ist eine wichtige Größe bei der Einkopplung von Licht. Strahlen, die unter zu großen Winkeln auf die LWL-Stirnfläche treffen, werden im LWL nicht totalreflektiert, sondern gelangen in den Mantel und unterliegen dort einer starken Dämpfung.

Eine wichtige Eigenschaft eines LWL stellt seine Dämpfungscharakteristik dar. Dämpfung ist allgemein eine Minderung der übertragenen Energie eines Signals im Verlauf

einer Übertragungsstrecke und kann im Bezug auf optische Signale durch eine Vielzahl von Faktoren hervorgerufen werden. Die wichtigsten dabei sind Absorptions- und Streuverluste. Erstere entstehen infolge von Verunreinigungen wie z.B. durch Metall- und Hydroxylionen [EBERLEIN, 1998]. Durch Molekülschwingungen können Eigenabsorptionen des Materials im UV- (elektronische Absorption) und längerwelligen IR-Bereich (molekulare Absorption) bewirkt werden, was gleichermaßen den nutzbaren Wellenlängenbereich begrenzt. Streueffekte in Form der RAYLEIGH-Streuung sind auf Brechzahl- und Dichtefluktuationen im Glas zurückzuführen [EBERLEIN, 1998]. Weitere Übertragungsverluste können durch Abstrahlung aufgrund geometrischer Unregelmäßigkeiten oder ungenügender Reflexionseigenschaften (z.B. Krümmungen) des LWL hervorgerufen werden [REITMAYER, 2000].

Die Dämpfung als Verminderung der optischen Signalleistung durch obige Verluste zwischen den beiden Endflächen eines Lichtwellenleiters A in Dezibel wird ausgedrückt durch

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_1} \quad [dB]. \quad (15)$$

Dabei ist P_0 die in den LWL eingekoppelte Leistung und P_1 die Ausgangsleistung. Bezogen auf die Faserlänge L und Wellenlänge λ wird der wellenlängenabhängige Dämpfungskoeffizient $\alpha(\lambda)$ herangezogen:

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L} \quad [dB/km]. \quad (16)$$

Eine weitere Möglichkeit, die Dämpfung a als dimensionslose Größe in Abhängigkeit der LWL-Länge auszudrücken, ist [EBERLEIN, 1998]:

$$P_1(L) = P_0 e^{-a(L)} \quad [Np]. \quad (17)$$

Neben der Dämpfung können auch Dispersionseffekte eine Abschwächung des Ausgangssignals bewirken. Unter Dispersion versteht man die Verbreiterung des Lichtimpulses durch Laufzeitunterschiede der Moden, was eine Begrenzung der Übertragungsbandbreite zur Folge hat.

Die Anwendung von Lichtwellenleitern im Bereich der Informations- und Nachrichtentechnik ist weit verbreitet. Dies ist auf eine Vielzahl von Eigenschaften zurückzuführen [REITMAYER, 2000]:

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

3 Messung der solaren Strahlung im Bestand

Zur Erfassung der dreidimensionalen spektralen Strahlungsverteilung in einem über 50 Jahre alten Fichten-Buchen-Mischbestand wurde in der vorliegenden Arbeit ein Vielkanalmesssystem entwickelt. Der neuartige Versuchsaufbau mit sphärischen Sensoren zur Erfassung der Photonenflussraten im Spektralbereich 360 nm – 1020 nm ermöglicht eine quasi-simultane Messung in allen Ebenen des Bestandes. Die Anlage wurde am 13.10.2004 mit 126 Sensoren, angeordnet in einem Raumgitter, in Betrieb genommen. Im April 2005 wurde die bestehende Anlage um weitere vier Sensoren auf eine Gesamtzahl von 130 erweitert. Eine nähere Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in Kap. 3.2.4 zu finden.

Als Vorläufermodell kann auf die bereits installierte Strahlungsanlage von REITMAYER [2000] zurückgegriffen werden. Diese misst an 200 Messpunkten, angeordnet an 40 Intensivmessästen, die PAR in einer zeitlichen Auflösung von ca. 12 Minuten. An den Messstellen wurden Sensoren aus 0,98 mm Polymethylmetacrylat-Fasern (PMMA) und Sensorköpfen aus Polyoximethylen (POM) montiert. Aufgrund der Absorptionseigenschaften dieser Materialien beschränkt sich der Messbereich auf Wellenlängen zwischen 400 nm und 700 nm. Zusätzlich zu den 200 auf PMMA basierenden Sensoren wurden vier Vertikalprofile eines anderen Sensortyps an den Messstürmen und 20 Sensoren am Bestandesgrund montiert, die in einem erweiterten Messbereich von 380 nm bis 850 nm die Strahlung erfassten. Den Kern dieses Sensortyps bildet eine Quarzglasfaser, was auch die höhere Transmission jenseits der PAR erklärt [REITMAYER ET AL., 2002].

Die Anordnung der Sensoren, mit einer Klumpung von jeweils fünf Sensoren pro Messast und den 40 Messästen in unmittelbarer Nähe zum Gerüst sowie den direkt am Gerüst montierten Profilen, wurde vorrangig für Photosyntheseberechnungen auf Astebene konzipiert. Zur dreidimensionalen Bestimmung der Strahlungsverteilung und zur Validierung von berechneten Modelldaten ist dieser Aufbau aufgrund der Klumpung jedoch relativ ungeeignet. Hierfür eignet sich idealerweise eine Rasteranordnung von oberhalb der Baumkrone bis an den Bestandesgrund (siehe Kapitel 3.2.4). Neben der räumlichen Anordnung ist auch eine Erweiterung des Spektralbereichs von großem Nutzen für die Charakterisierung des kurzwelligen Strahlungsklimas in einem derartigen Mischbestand.

3.1 Sphärische Sensoren zur spektralen Strahlungsmessung

Die von REITMAYER [2000] beschriebenen Messfühler auf Glasfaserbasis bilden die Grundlage für die aktuelle Weiterentwicklung. Aus neuem Glasfaser-Material und den bisher vorhandenen Glasfasersensoren wurde ein neuer Sensortyp konzipiert, mit dem das Ziel erreicht werden konnte, in einem erweiterten Spektralbereich (360 nm – 1020 nm) quasi-simultane Messwerte für ein Raumgitter auf Bestandes-

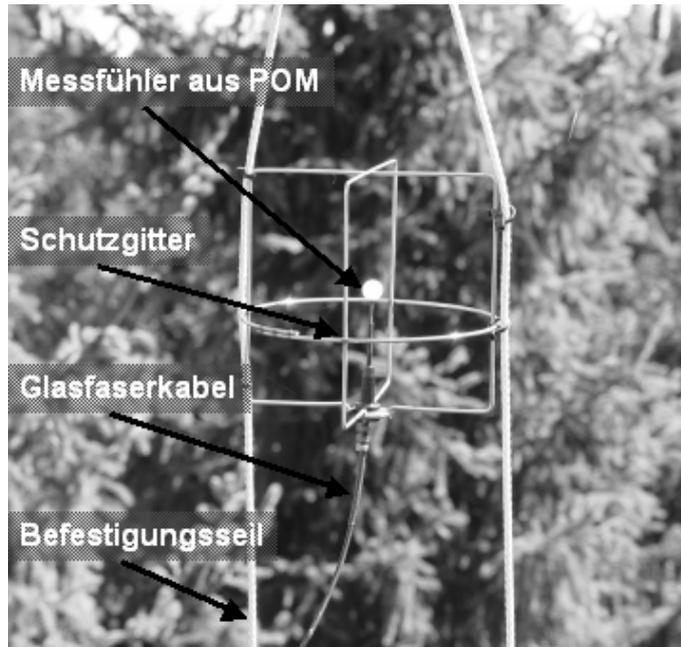


Abbildung 4: Sphärischer Sensor zur Messung der Photonenflussrate (PFR) aus dem gesamten Raumwinkel Ω mit Schutzkäfig. Der Sensor setzt sich aus einem sphärischen POM-Diffusorkopf und einer darin befestigten Quarzglasfaser zusammen.

ebene zu erhalten. Die Eigenschaften und Materialien dieses neu entwickelten Sensortyps (Abb. 4) werden im Folgenden beschrieben. Ein kurzer Exkurs über die LWL-Theorie erfolgte bereits in Kap. 2.3.

Das Kernstück des neuen Sensortyps bildet ein LWL aus Quarzglasfaser mit $600\ \mu\text{m}$ Durchmesser (Typ Optran PWF 600 N) der Firma CeramOptec GmbH. Es handelt sich um einen Multimode-Stufenindex-LWL, der im Unterschied zu Monomode-LWL bessere Lichttransporteigenschaften in einem größeren Spektralbereich aufweist (siehe Kapitel 2.3) und damit für diese Anwendung am besten geeignet ist. Der relativ große Querschnitt von $600\ \mu\text{m}$ garantiert bei der Signalweiterleitung den Transport von höheren Lichtintensitäten [KERSTEN, 1984] und stellt einen guten Kompromiss in Bezug auf den mit dem Durchmesser steigenden Preis dar. Die Längen ergeben sich aus der Position der Sensoren im Bestand und liegen zwischen 5,7 m und 40,7 m. Um den Faserkern befindet sich eine $60\ \mu\text{m}$ starke Silikonumhüllung (Cladding), die die Totalreflexion bei Einhaltung der minimalen Biegeradien sicherstellt. Als Schutz ist auf das Cladding eine $100\ \mu\text{m}$ dicke Nylonschicht (Coating) aufgetragen, die die Faser vor Temperaturschwankungen, mechanischen und chemischen Einflüssen schützt. Eine PVC-Ummantelung mit einem Durchmesser von 2,7 mm wurde lose aufgeschoben und an den Enden mit Schrumpfschlauch fixiert. Sie dient als zusätzlicher Schutz für Faser, Cladding und Coating.

Die Glasfaser-LWL besitzen einen maximalen Öffnungswinkel. Licht, das unter einem größeren Winkel zur achsparallelen Richtung einfällt, wird nicht weitergeleitet,

da im LWL unter diesen Umständen keine Totalreflexion stattfinden kann (siehe Kapitel 2.3). Zur Erfassung eines größeren Raumwinkels, in diesem Fall des gesamten Raumwinkels Ω ($= 4 \pi$ sr, ohne die Einkopplungsstelle der Glasfaser), muss ein Difusorkopf angebracht werden, der das Licht aus allen Raumwinkeln in den Grenzwinkelbereich streut. Um eine homogene, winkelunabhängige Lichteinkopplung aus allen Raumwinkeln zu realisieren, werden deshalb als Sensorkopf geschliffene, lunkerfreie, opaque Vollkugeln aus POM mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet. Das Ende des Glasfaser-LWL wird in eine 4,6 mm tiefe Bohrung der Kugel gesteckt. Diese optimale Bohrtiefe von 4,6 mm wurde von REITMAYER [2000] empirisch ermittelt und durch eigene Messungen bestätigt. Bei der ermittelten Tiefe besteht eine optimale richtungsunabhängige Einkopplung bei unterschiedlichen Strahlungseinfallswinkeln (vgl. Kapitel 3.1.3).

Zum Schutz der Sensorköpfe vor mechanischen Überbeanspruchungen im Bestand, z.B. durch Äste und Zweige, dienen Schutzbügel aus 2 mm federhartem Edelstahl. Die Abschattung dieser Schutzvorrichtung ist nur an Tagen mit größerem Anteil direkter Strahlung an der Globalstrahlung und nur für der Sonne direkt exponierte Sensoren (Referenzsensoren über dem Bestand) relevant. Der Zeitpunkt der Abschattung und damit der Reduktion der Strahlungsmenge kann aus Vergleichen mit einem gleichartigen Sensor ohne Schutzbügel ermittelt und die Werte entsprechend korrigiert werden. Die Zugentlastung der LWL wird durch Nylonseile gewährleistet.

Über die Wintermonate (Dezember – Februar) wurden 91 Sensoren zum Schutz vor Stürmen und Schnee in eigens angefertigte Schutzbehältnisse aus Polyethylen gehüllt. Die restlichen 35 Messfühler blieben über die gesamte Zeitperiode in Betrieb.

Beim Vergleich der in dieser Studie verwendeten raumintegrierenden sphärischen Sensoren mit kosinusgetreuen Planarsensoren wie beispielsweise dem häufig eingesetzten Quantensensor von LI-COR (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR Inc., Nebraska, USA) werden grundlegende Unterschiede deutlich (siehe Kap. 3.3.1). Die sphärischen Sensoren messen die (monochromatische) PFR und koppeln somit winkelunabhängig aus nahezu allen Raumwinkeln (Ausnahme: 'Südpol' wegen Glasfaserausgang) die dort auftretende Strahlungsmenge mit gleicher Empfindlichkeit ein. Ein kosinuskorrigierter Planarsensor misst hingegen ankommende Strahlung lediglich aus einer Hemisphäre kosinusgetreu. Die Einkopplung aus verschiedenen Zenitwinkeln erfolgt nach dem Kosinus-Gesetz von LAMBERT. Die Messung liefert daher den Wert der Strahlungsmenge, die auf eine zum Zenit (oder einer anderen beliebigen, aber festgelegten Ausrichtung) senkrecht ausgerichtete, plane Fläche auftreffen würde, nicht den tatsächlich an dieser Stelle auftretenden Strahlungsfluss des entsprechenden Halbraumes.

Zur Messung des kosinusgetreuen Photonenflusses müssen die Bedingungen der Zweidimensionalität des bestrahlten Objektes, seiner Orientierung in parallelen Ebenen und der ausbleibenden Milieureflexion erfüllt sein, was bei manchen Rosettenpflanzen und Thalloyphyten im schwarzen Raum gegeben ist [HARTMANN, 1978]. Bei mehr oder weniger dreidimensionalen Objekten oder bei Exposition im hellen oder streuen-

den Raum ist eine Bestimmung der monochromatischen PFR am Expositionsort die zu bevorzugende Vorgehensweise [SMITH UND MORGAN, 1981, HARTMANN, 1978]. KUBÍN [1971] bezeichnet die Verwendung von sphärischen Sensoren als die geeignete Methode zur Untersuchung der Strahlungsflüsse von Pflanzen in oder unter dichten Kronen. Auch BJÖRN UND VOGELMANN [1996] sowie SMITH [1982] sehen die beste Annäherung zur Messung der tatsächlich erhaltenen Strahlung eines Rezeptors einzig durch die Messung des Strahlungsflusses mit einem integrativen sphärischen Detektor gegeben. Für eine pflanzenrelevante Betrachtung von Strahlungsflüssen ist es daher unerlässlich, die seitlich einfallende Strahlung ebenfalls zu berücksichtigen und die Photonenströme am Bestrahlungsort raumintegrierend zu messen.

In Kap. 3.3.1 werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen zwischen sphärischen und planaren Sensoren unter verschiedenen Rahmenbedingungen im Labor und im Freiland beschrieben.

3.1.1 Konfektionierung der Lichtwellenleiter

Unter Konfektionierung von Lichtwellenleitern versteht man das Bearbeiten der beiden Glasfaserenden. Um Reflexionsverluste bei der Ein- und Auskopplung von Licht auf ein Minimum zu reduzieren, müssen die beiden Oberflächen große Homogenität aufweisen, d.h. rechtwinklig geschliffen und extrem plan poliert sein. Dies kann direkt vom Glasfaserhersteller durchgeführt werden, ist allerdings sehr teuer. Aus finanziellen Gründen musste daher die Konfektionierung der Quarzglasfasern für alle Sensoren in Eigenarbeit geleistet werden.

Hierzu wurde eine Spezialpoliervorrichtung entwickelt, anhand derer die Kriterien für eine optimale Ein- und Auskopplung an den Glasfaserenden gewährleistet sind. An einer Antriebswelle, die über einen Motor angetrieben wird, werden Aluminiumscheiben mit einem Magneten befestigt. Auf den Scheiben befinden sich Polierfilme der Firma 3M mit unterschiedlicher Körnung (30/12/9/5/3/1/0,3/0,05 μm) aus Aluminiumoxid (Al_2O_3). Mit einer Mikrometerschraube kann eine speziell angefertigte Spannzange, in der sich die Glasfaser befindet, langsam manuell an die rotierende Scheibe herangefahren werden. Sequentiell muss die Glasfaseroberfläche die acht Poliervorgänge von 30 μm bis 0,05 μm Körnung durchlaufen. Über zwei Binokulare erfolgt nach jedem Polierschritt eine Qualitätskontrolle der Faseroberfläche und des -randes. Bei der geringsten Unsauberkeit müssen alle Polierschritte erneut durchgeführt werden.

3.1.2 Aufbau und Konzeption der Kalibrierung

Um die Transmissions- bzw. Dämpfungseigenschaften der Sensoren mit Glasfaser-LWL zur Erfassung der solaren Strahlung im Bereich 360 nm bis 1020 nm im Bestand spektral und integral exakt zu charakterisieren, wurde basierend auf der Beschrei-

bung von BERNHARD [1993] ein hochpräzises Kalibrierverfahren entwickelt. Die daraus resultierenden wellenlängenspezifischen Kalibrierfaktoren für Spektrometer und Sensoren dienen zur Korrektur der gemessenen Werte und damit zur Ermittlung der tatsächlichen PFR für den jeweiligen Spektralbereich.

Zur Durchführung der Experimente wurde in einem fensterlosen Kellerraum mit 6 m² Grundfläche ein Kalibrierlabor eingerichtet. Um Streulicht zu verhindern wurden Wände, Decke und sonstige nicht-schwarze Flächen mit mattschwarzem Stoff abgehängt bzw. mit mattschwarzer Farbe lackiert. Der Boden wurde mit mattschwarzem Gummi ausgelegt. Das Labor ist durch einen schwarzen Trennvorhang in einen Lampen- und einen Geräteraum geteilt. Der Lichtstrahl ist auf einen kleinen Kegel um den zu kalibrierenden Sensor beschränkt. Auf Grund dieser Maßnahmen wird sichergestellt, dass die von den Halogenlampen emittierte Strahlung nur auf direktem Weg in die Messoptik eintreten kann und Streueffekte weitestgehend ausgeschaltet werden. Im Lampenraum befinden sich die Quarzhalogenleucht Lampen, die als Strahlungsquellen für den Kalibriervorgang dienen. Die Lampen sind durch einen Sockel mit einer optischen Bank verbunden, an deren entgegengesetztem Ende die Eintrittsoptik des Spektrometers bzw. die winkelverstellbare Halterung für die zu kalibrierenden Sensoren angebracht sind. Getrennt werden die Lampen vom Spektrometeradapter bzw. von der Sensorhalterung durch eine Wand, die anhand von Blenden mit variablen Durchmessern nur für direkt einfallende Lichtstrahlen durchlässig ist. Im abgetrennten Geräteraum befinden sich sämtliche Steuerungs-, Kontroll- und Datenerfassungsgeräte.

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt für den Bereich von 360 nm bis 1020 nm mit einer spektralen Auflösung von 0,8 nm. Die transmittierte Intensität der in den Quarzglas-LWL eingekoppelten UV-Strahlung (< 360 nm) liegt unterhalb des Detektionslimits des Spektrometers. Dies ist auf die Absorptionseigenschaften der Diffusorkugeln aus POM-Kunststoff zurückzuführen. Aus diesem Grund wird für die Messung nur der o.g. Spektralbereich herangezogen.

3.1.2.1 Strahlungsquellen

Als Strahlungsquelle für die Kalibrierung dient eine von der Firma Gigahertz-Optik GmbH werkskalibrierte Sylvania 1000 W Wolfram-Halogen-Glühlampe mit Quarzkolben (Serien-Nr. BN-9101-363), die in einen speziellen Lampenhalter montiert ist. Hierzu ist der Lampenkolben in einem Metallkörper einzementiert. Der Glühdraht der Lampe ist eine Doppelwendel, die als zylindrische Spirale mit einem Durchmesser von 7 mm geformt ist. Dabei sind Spiralachse und Kolbenachse identisch. Die spektrale Bestrahlungsstärke der 1000 W Lampe wurde durch einen Vergleich mit einem in Referenz zu der Physikalischen Technischen Bundesanstalt (PTB) kalibrierten Transferstandard bestimmt. Um systematische Fehler bei den Kalibrierarbeiten möglichst klein zu halten, müssen die im Kalibrierschein angegebenen Bedingungen exakt eingehalten werden. Aufgrund des großen finanziellen und zeitlichen Aufwands einer Rekalibrierung ist es für den täglichen Messbetrieb notwendig, unka-

librierte Lampen an dem Sekundärstandard zu kalibrieren [BERNHARD, 1993]. Als Arbeitsnormale dienen daher 400 W Quarzhalogenleuchtampen der Firma OSRAM (Typ Xenophot HLX 64665 Longlife), deren spektrale Bestrahlungsstärken an der kalibrierten 1000 W Lampe spezifiziert werden können. Diese Strahler sind in einer speziellen Lampenfassung mit Sockel montiert. Um Emissionsvariabilitäten zu vermeiden, werden die 400 W Lampen vor Kalibriergebrauch 16 Stunden bei konstanter Stromzufuhr eingebrannt. Die 1000 W Lampe wurde bereits im Kalibrierlaboratorium für optische Strahlungsgrößen der Firma Gigahertz-Optik 70 Stunden eingebrannt und die letzten 30 Stunden zertifiziert. Die Langzeitstabilität der relativen Änderung des Spannungsabfalls liegt im Bereich $< 1,5 \cdot 10^{-4}$.

3.1.2.2 Lampenversorgung und Steuerung

Zur genauen Messung der Photonenflüsse ist es besonders wichtig, die durch die Werkskalibrierung vorgegebenen Rahmenbedingungen hochpräzise einzuhalten, um die Langzeitstabilität zu gewährleisten. Um eine signifikante Variabilität der emittierten Strahlung der 1000 W Quarzhalogenlampe zu verhindern, müssen einige Faktoren beachtet werden. Es ist daher erforderlich, die Lampe mit 8,1000 A Gleichstrom zu betreiben. Die Lampenspannung sollte dabei ca. 110,5 V betragen. Zur Gewährleistung dieser Vorgaben der Messbedingungen wird die Lampe in Serie mit einem $100 \text{ m}\Omega$ Ultrapräzisionswiderstand (Typ USR 4-4020 D 0R1 TK3 mit 0,100% Toleranz) der Firma Powertron GmbH an ein 1500 W Netzteil (Typ SM 120-13) der Firma Delta Elektronik BV mit wahlweise einer Strom- und Spannungsstabilität von $5 \cdot 10^{-5}$ angeschlossen. Ein angebaute Ventilator und ein Kühlkörper ermöglichen den Dauerbetrieb. Der Spannungsabfall am Widerstand wird mit einem mehrkanaligen Digitalmultimeter (Modell 2000 $6\frac{1}{2}$ digits) der Firma Keithley bestimmt. Mit Hilfe dieses Wertes kann der Strom, der durch die Lampe fließt, berechnet werden. Die präzise Strom- und Spannungsversorgung wird über die serielle Schnittstelle am Computer geregelt. Damit kann der Strom durch die Lampe mit hoher Präzision konstant auf der geforderten Stromstärke von 8,1000 A gehalten werden.

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Sylvania 1000 W Lampe gegen sofortiges Ein- und Ausschalten wegen einer möglicherweise daraus resultierenden irreversiblen Änderung des emittierten Spektrums ist ein langsames schrittweises Hoch- und Herunterregeln des Lampenstroms nötig. Die Zeitvorgabe für diese Ein- und Ausschaltvorgänge beträgt 40 Sekunden. Dies wird rechnergesteuert anhand einer gleichmäßigen Rampenfunktion durchgeführt. Hierzu musste das vorhandene Ansteuerungsprogramm des Netzteils entsprechend umprogrammiert werden. Als Programmiersprache wurde hierfür QBASIC verwendet. Ferner muss die Strahlungsquelle etwa 30 Minuten vor Messbeginn angeschaltet werden, um konstante Emission zu gewährleisten.

Der Betrieb des 400 W Arbeitsnormals erfordert ebenfalls konstante Messbedingungen. Ein- und Ausschaltvorgänge erfolgen über die gleiche Rampenfunktion wie bei dem Standardstrahler. Alle verwendeten Lampen wurden mindestens 16 Stunden

eingebraunt und dabei mindestens zweimal ein- und ausgeschaltet. Der konstante Stromfluss durch die Lampen muss 11,0708 A betragen. Lampen, die nicht die erforderliche Langzeitstabilität aufwiesen, wurden als kalibrieruntauglich eingestuft und nicht zur Kalibrierung herangezogen. Die Stromstärke wird ebenfalls über den Spannungsabfall am Präzisionswiderstand gemessen. Abb. 5 zeigt das Emissionsspektrum einer 400 W Wolfram-Halogen-Lampe, die als Kalibrierstandard herangezogen wurde.

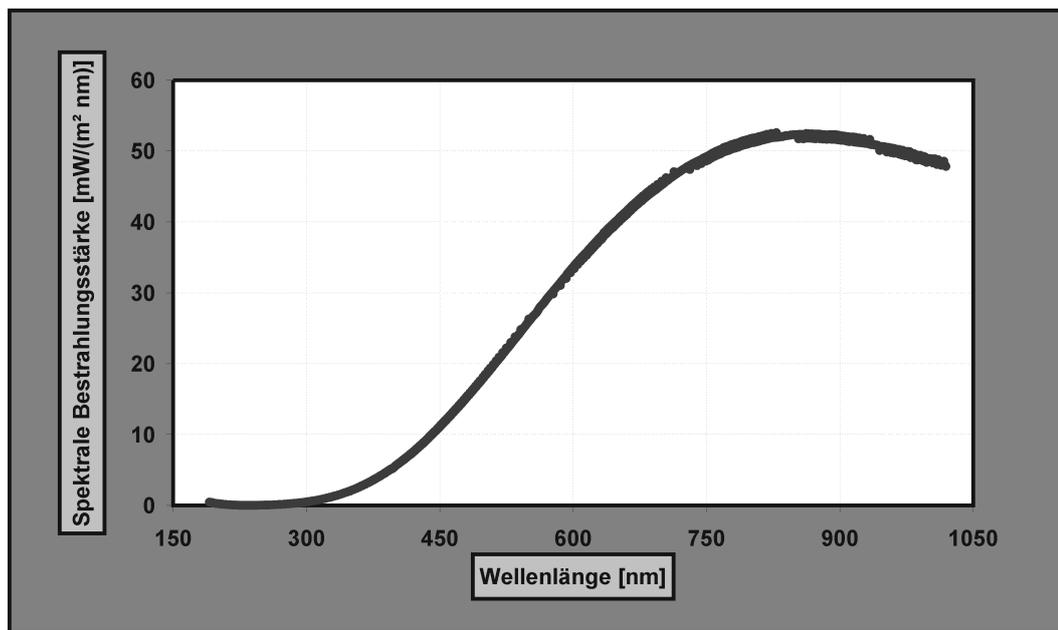


Abbildung 5: Emissionsspektrum einer 400 W Wolfram-Halogen-Lampe in 700 mm Abstand zum Spektrometer

3.1.2.3 Spektrometer

Zur Kalibrierung wurde das quasi-monolithische Diodenarray Multi-Channel-Spektrometer-Modul (MCS-Modul) mit 1024 Pixeln der Firma Zeiss verwendet (Abb. 16), mit dem auch die spektralen Strahlungsmessungen im Bestand durchgeführt werden. Die Einkopplung der Strahlung erfolgt über einen speziell konfektionierten Faseradapter mit einem Öffnungsquerschnitt von 0,6 mm. An beiden Enden ist ein SMA-Stecker angebracht, an den die LWL-Enden der Sensoren in einem Spezialadapter angekoppelt werden, was eine nahezu verlustfreie Verbindung zum optischen Eingang des Spektrometers gewährleistet. Eine detailliertere Beschreibung des MCS-Moduls findet im Kap. 3.2.1 statt. In Abb. 6 ist die Spektrometer-Antwortkurve bei Bestrahlung mit der 1000 W Kalibrierlampe dargestellt. Sie zeigt die Energie in $[\text{mW}/\text{m}^2]$ für jeden Zählimpuls [Count] des Spektrometers wellenlängenspezifisch, d.h. pro Pixel des Diodenarrays.

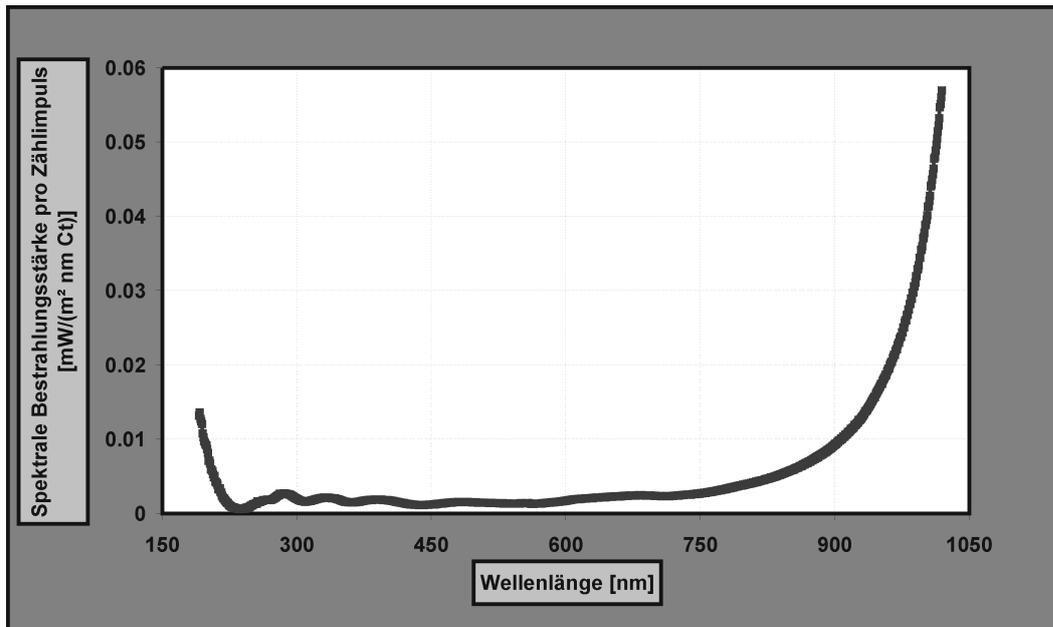


Abbildung 6: Antwortkurve des Spektrometers bei einer 1000 W Wolfram-Halogen-Lampe in 700 mm Abstand

3.1.2.4 Versuchsaufbau

Die Strahlungsquelle befindet sich 400 mm von der Trennblende entfernt in 177 mm Höhe über dem schweren, schwingungsarm aufgestellten Tisch, der die Kalibriervorrichtung vor Erschütterungen und Bewegungen schützt. Die Lampensockel sind mit vertikal verstellbaren Halterungen auf einer optischen Bank montiert. Auf der entgegengesetzten Seite der Bank kann wahlweise eine speziell angefertigte Halterung für die Kugelsensoren oder der Faseradapter zur direkten Lichteinkopplung ins Spektrometer befestigt werden. Der Abstand zwischen Fadenkreuz der Justierhilfe der Strahlungsquelle und Sensor muss aufgrund der Vorgaben der Werkskalibrierung in jedem Fall exakt 700 mm betragen. Die genaue Justierung der einzelnen Kalibrierkomponenten und Sensoren wird durch einen 700 mm langen Abstandshalter gewährleistet. Die Halterung für die Kugelsensoren wurde zur optimalen Messung der Richtungscharakteristik bei der Einkopplung angefertigt. Sie ermöglicht eine Positionierung um zwei senkrecht aufeinander stehenden Achsen, die eine Messung von sieben Punkten auf vier Meridianen sowie dem 'Nordpol' der Kugel in einem konstanten Abstand von 700 mm zur Strahlungsquelle erlaubt.

Im Geräteraum befinden sich die Strom- und Spannungsversorgung der Lampe, der Präzisionswiderstand, das Digitalmultimeter, das Spektrometer mit Betriebselektronik sowie der Computer zur Regelung des Stromflusses durch die Lampe, zur Datenaufnahme und Datenverarbeitung. Das Labor ist zusätzlich mit einem Luftabzug ausgestattet, der die überflüssige Wärme, die im Raum produziert wird, abführt.

3.1.2.5 Kalibriervorgang

Zur Strahlungskalibrierung mussten aus Zeit- und Kostenaspekten die spektralen Bestrahlungsstärken des Arbeitsnormals, bestehend aus den 400 W Quarzhalogenstrahlern von OSRAM, spezifiziert werden. Hierzu wurde sequentiell unter gleichen Messbedingungen die Spektrometer-Antwort des 1000 W Sekundärstandards und des jeweiligen Prüflings in zwölfmaliger Wiederholung gemessen. Die Kalibrierung der LWL-Sensoren erfolgte anhand des Arbeitsnormals. Hierzu wurden die Kugelsensoren in einer speziell angefertigten Halterung justiert, die im Abstand von 700 mm von der Strahlungsquelle aufgebaut wurde. Im Abstand von 400 mm von der Lampe und damit 300 mm von der Spektrometereinkopplung bzw. dem Sensor, wurde eine Blende mit einem Durchmesser von 40 mm angebracht, um zu gewährleisten, dass ausschließlich von der Lampe direkt emittierte Strahlung den Sensor erreicht. Um für alle Prüflinge die gleichen Messbedingungen sicherzustellen, wurde bei Änderungen im Spannungsabfall am Widerstand die Stromzufuhr nachgeregelt. Des Weiteren wurde nach der Kalibrierung aller Sensoren erneut eine Referenzmessung der Strahlungsquelle vorgenommen, um etwaige Variabilität der Strahlungsemission auszuschließen.

Jeder Sensor wurde sequentiell an 29 unterschiedlichen Positionen und damit an 29 Strahlungseinfallswinkeln in dreifacher Wiederholung kalibriert. Anhand einer eigens entwickelten Software wurden die jeweiligen Spektren aufgezeichnet und statistische Parameter wie z.B. Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Aus den Ergebnissen dieser Berechnungen konnten somit für jeden Sensor und jede Wellenlänge (Auflösung ca. 0,8 nm) Umrechnungsfaktoren bestimmt werden, anhand derer eine Quantifizierung der solaren Strahlung im Wellenbereich zwischen 360 nm und 1020 nm auf der Versuchsfläche erfolgen kann. Eine ausführliche Beschreibung der Richtungscharakteristik erfolgt im Kapitel 3.1.3.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Kalibrierung wurde für einen zufällig ausgewählten Sensor der gesamte Kalibriervorgang in zehnfacher Wiederholung durchgeführt. Dabei wurde der Sensor jedes Mal komplett aus der Halterung genommen und wieder eingesetzt. In Abb. 7 ist die Reproduzierbarkeit des Kalibriervorgangs bei zehnfacher Wiederholung spektral aufgelöst (mit Standardabweichung) dargestellt.

3.1.2.6 Kalibrierfaktoren

Aus der Kalibrierung des 400 W Arbeitsnormals ist die spektrale Bestrahlungsstärke $I_e(\lambda)$ in 700 mm Abstand bekannt. Die relative Dämpfung jedes einzelnen Sensors kann nun aus dieser Größe und der durch den Sensor transmittierten Strahlung ermittelt werden. Zur Berechnung der Faktoren werden nur die gemittelten Werte aus den Messungen mit Lichteinkopplung aus der Nordhalbkugel des Sensors herangezogen (siehe Kapitel 3.1.3). Der wellenlängen- und sensorspezifische Kalibrierfaktor $\kappa_s(\lambda)$ ergibt sich somit aus dem Quotienten der spektralen Bestrahlungsstärke

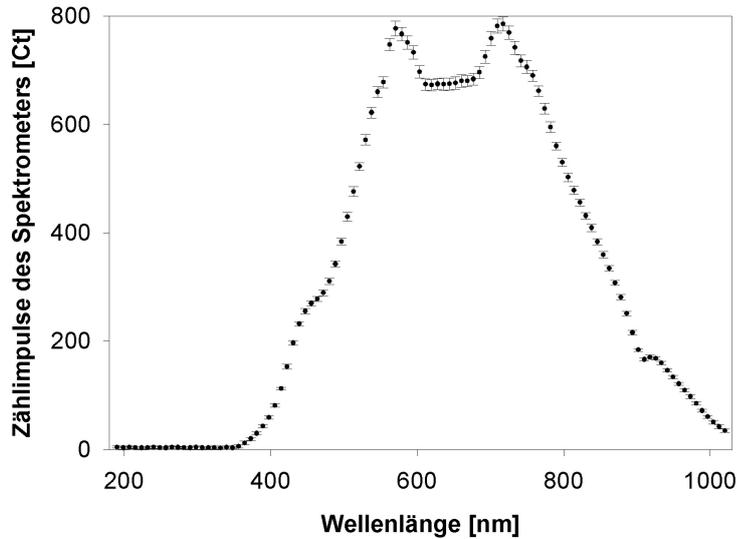


Abbildung 7: Reproduzierbarkeit des Kalibriervorgangs bei zehnfacher Wiederholung der Messungen an einem zufällig ausgewählten Sensor. Zur besseren Anschaulichkeit ist nur jede zehnte Wellenlänge dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardabweichungen.

und dem gemessenen wellenlängenspezifischen Messsignal $N_S^0(\lambda)$ des Sensors S der Normlampe:

$$\kappa_S(\lambda) = \frac{I_e(\lambda)}{N_S^0(\lambda)} \left[\frac{mW}{m^2 \text{ nm Ct}} \right]. \quad (18)$$

Um bei der tatsächlichen Messung mit den Sensoren im Bestand die korrekten Werte für die PFR zu erhalten, müssen die wellenlängenspezifischen Counts (N_S) mit den jeweiligen Korrekturfaktoren multipliziert und für den gewünschten Spektralbereich aufsummiert werden:

$$\phi = \sum_{i=m}^n N_S(\lambda_i) \kappa_S(\lambda_i) \left[\frac{mW}{m^2} \right]. \quad (19)$$

Als typisches Beispiel sind in Abb. 8 die spektralen Kalibrierfaktoren eines zufällig ausgewählten Sensors dargestellt. Aufgrund der hohen Dämpfung und der großen Variationsbreite der Kalibrierfaktoren im UV-Bereich werden zur Messung im Bestand erst Werte ab 360 nm betrachtet.

3.1.3 Richtungscharakteristik der Sensoren

Zur Messung mit sphärischen Sensoren, die über den gesamten Raumwinkel integrieren, ist es notwendig, das Verhalten bei der Lichteinkopplung aus dem gesamten $4\pi \text{ sr}$ -Bereich zu charakterisieren. Aus diesem Grund wurde eine winkelverstellbare

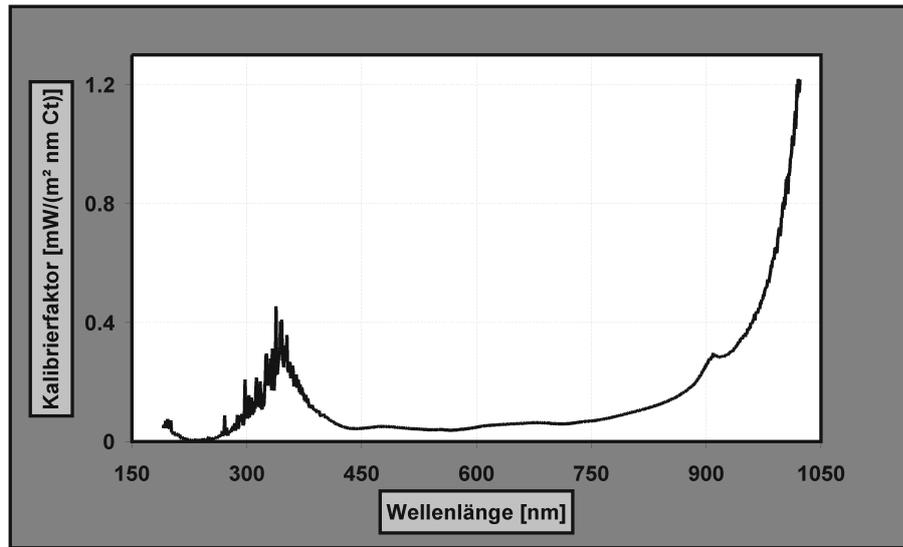


Abbildung 8: Wellenlängenspezifische Kalibrierfaktoren eines zufällig ausgewählten Sensors

Spezialvorrichtung konstruiert, anhand derer die gewünschten Vorgaben erfüllt (siehe Kapitel 3.1.2.4) und die Kugelsensoren in 29 variablen Positionen (plus eine Doppelmessung der Nordpol-Position) zur Strahlungsquelle kalibriert werden können. In Abb. 9 sind diese Positionen auf der Kugeloberfläche zweidimensional dargestellt. Die Anordnung der Lichteinkopplungswinkel erfolgt entlang von vier Meridianen im 90°-Abstand bei 60°, 45° und 30° nördlicher und südlicher Breite sowie am Äquator und am Nordpol. Das ergibt zwölf Messpunkte auf der Südhalbkugel, vier auf dem Äquator und 13 auf der Nordhalbkugel. Die 29 verschiedenen Strahlungseinkopplungswinkel ermöglichen eine sehr genaue Beschreibung der Richtungscharakteristik bei der Lichteinkopplung. Alle Messungen wurden mit dreifacher Wiederholung durchgeführt. Somit ergeben sich 87 Messungen (eigentlich 90 Messungen, da der Nordpol zur Überprüfung doppelt positioniert wurde) aus allen Raumrichtungen und 39 (42) Messungen für den oberen Halbraum.

In Abb. 10 werden die spektralen Variationskoeffizienten für jede einzelne Wellenlänge bei Einkopplung aus allen Raumrichtungen (87 Messungen) und aus dem oberen Halbraum (39 Messungen), der für die Berechnung der Kalibrierfaktoren entscheidend ist, exemplarisch für einen Sensor verglichen. Die Werte für die Nordhemisphäre liegen immer niedriger als die Werte bei Einkopplung aus dem gesamten Raumwinkel. Die spektrale Auflösung zeigt, dass zwischen 360 nm und 400 nm die Dämpfung der Sensorkugel, die niedrigere Emission der Lampen und die etwas niedrigere Spektrometerempfindlichkeit die Abweichungen deutlich ansteigen lässt. Im PAR-Bereich von 400 nm bis 700 nm liegen die Kurven immer unter 2% bzw. 6% Abweichung. Die für das R/FR relevanten Bereiche um 660 nm und 730 nm liegen unter 0,5% bzw. 1,5%.

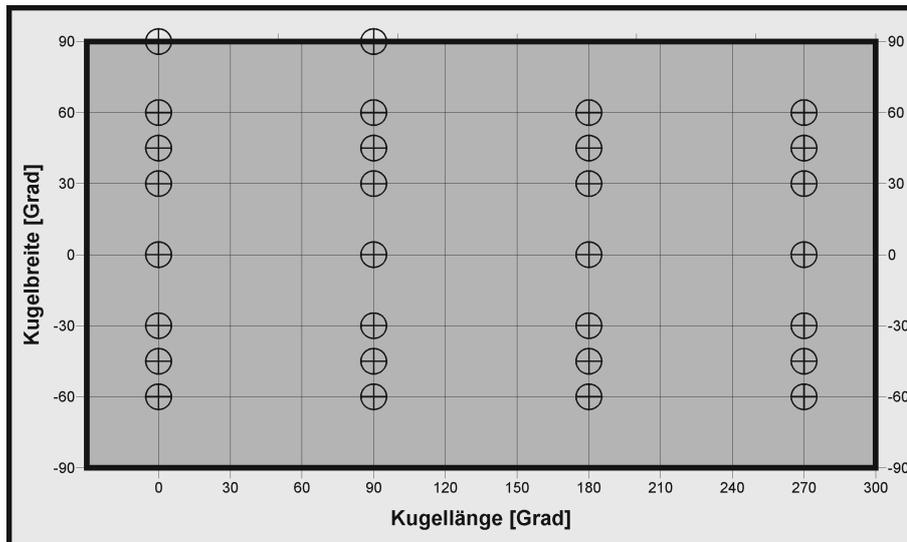


Abbildung 9: Zweidimensionale Darstellung der Kugeloberfläche mit den 30 Kalibrierpositionen (der „Nordpol“ wurde doppelt kalibriert). Positive Breiten bedeuten „nördliche“, negative „südliche“ Hemisphäre. Am „Südpol“ konnte aufgrund der LWL-Einkopplung nicht kalibriert werden.

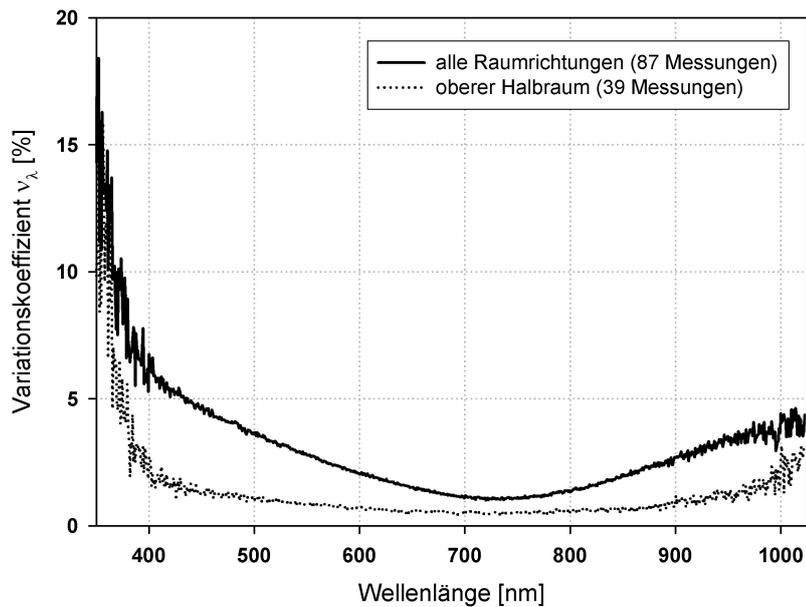


Abbildung 10: Vergleich der spektralen Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung eines zufällig ausgewählten Sensors. Dargestellt sind die spektralen Variationskoeffizienten für alle Raumrichtungen und für den oberen Halbraum.

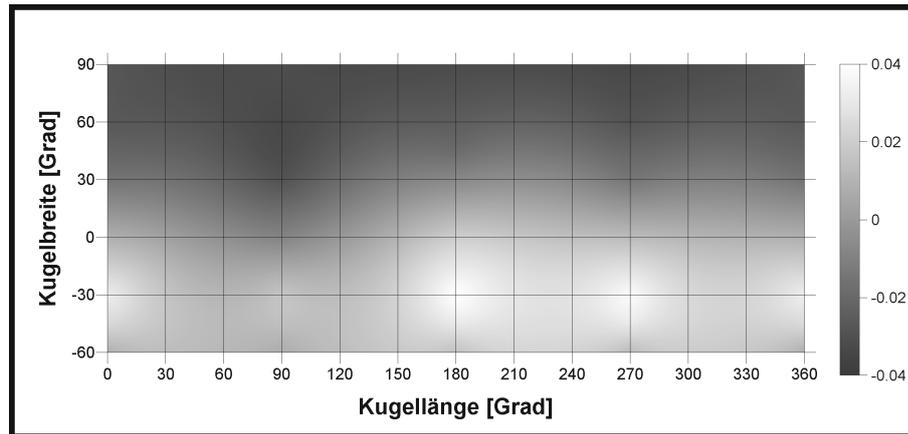


Abbildung 11: Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung eines zufällig ausgewählten Sensors (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom Mittelwert der 87 Messungen (29 Richtungen in drei Wiederholungen).

Messungen haben gezeigt, dass durchschnittlich über 95 % der einfallenden Strahlung über den oberen Halbraum eingekoppelt werden (100 % der direkten, 90 % der diffusen Strahlung). Die größten Variationen bei der Lichteinkopplung treten bei allen Sensoren auf der südlichen Hemisphäre auf. Aus diesem Grund werden zur Ermittlung der spektralen Kalibrierfaktoren nur die 39 Werte der Lichteinkopplung über die Nordhalbkugel herangezogen. Dadurch erhöht sich der Fehler bei der Einkopplung der Reflexionsstrahlung von unten, der Gesamtfehler wird jedoch kleiner.

Exemplarisch wird in Abb. 11 die Richtungscharakteristik eines Sensors auf der gesamten Kugelfläche für den PAR-Bereich dargestellt. Die maximale Abweichung vom Mittelwert, der aus allen 87 Messungen bei der Kalibrierung bestimmt wurde, liegt für diesen Sensor bei $\pm 3,5\%$, was vor allem auf den Unterschied zwischen Nord- und Südhalbkugel zurückzuführen ist. Der Variationskoeffizient hat einen Wert von 2,3 %. In Abb. 12 ist die deutlich größere Homogenität der Lichteinkopplung auf der Nordhemisphäre zu erkennen. Die maximale Abweichung vom Mittelwert, gebildet aus 39 Messungen, liegt bei diesem Beispiel unter $\pm 2\%$, der Variationskoeffizient bei 0,7 %.

Der zufällig ausgewählte Sensor stellt einen typischen Vertreter des entwickelten sphärischen Sensortyps dar. Um eine allgemeine Aussage über die Richtungsunabhängigkeit der Sensoren treffen zu können, müssen die ermittelten Werte aller Sensoren miteinbezogen werden. Als Spektralbereich wird wieder der PAR-Bereich herangezogen. In Abb. 13 sind die über 126 Sensoren gemittelten relativen Abweichungen vom arithmetischen Mittel als Indikator für die Einkopplungscharakteristik dargestellt. Identisch dem exemplarisch selektierten Sensor kann ein Einkopplungsmaximum auf der südlichen und ein Minimum der Einkopplung auf der nördlichen Halbkugel beobachtet werden. Der Wertebereich entspricht den Abweichungen des

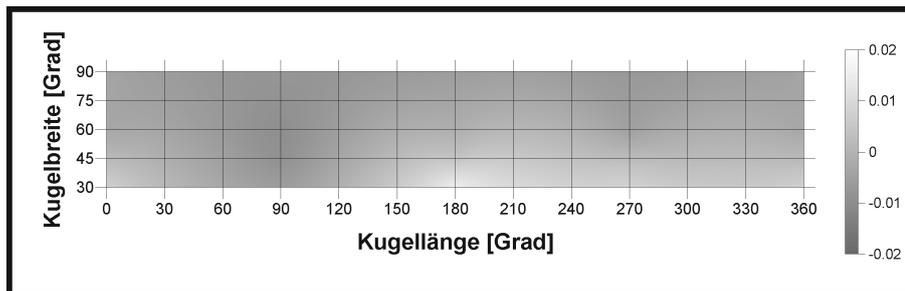


Abbildung 12: Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung in der Nordhemisphäre eines zufällig ausgewählten Sensors (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom Mittelwert der 39 Messungen (13 Richtungen in drei Wiederholungen) der Nordhalbkugel.

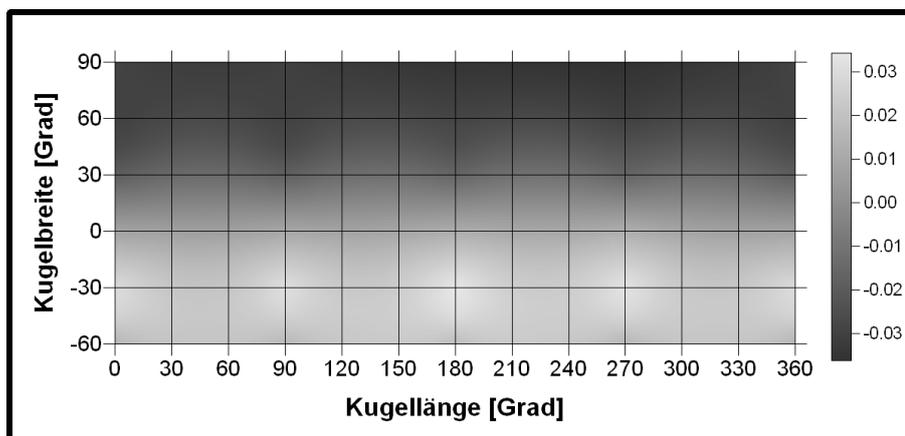


Abbildung 13: Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung von 126 Sensoren (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert aller Sensoren. Der Variationskoeffizient der Richtungscharakteristik für alle Sensoren und Einkopplungswinkel beträgt 4,8%.

einzelnen Sensors. Der Variationskoeffizient der Richtungscharakteristik für alle Sensoren und Einkopplungswinkel (126 Sensoren, 29 Winkel, 3 Wiederholungen) liegt bei 4,8%. Bei Betrachtung der Werte für die nördliche Hemisphäre allein, sinken auch hier die Abweichungen deutlich im Vergleich zum gesamten Raumwinkel. Der Variationskoeffizient beträgt für alle Sensoren 2,0%. Aus den ermittelten Werten kann gefolgert werden, dass die Lichteinkopplung annähernd richtungsunabhängig erfolgt.

Zur Bestimmung der Unterschiede bei der winkelabhängigen Strahlungseinkopplung zwischen den sphärischen Sensoren und kosinusgetreuen Planarsensoren wurde die Kalibriervorrichtung umgebaut. Eine Spezialhalterung ermöglicht eine Befestigung der planaren Quantensensoren von LI-COR an der winkelverstellbaren Schiene. Damit kann der Quantensensor an vier Meridianen und fünf Strahlungseinfallswinkeln

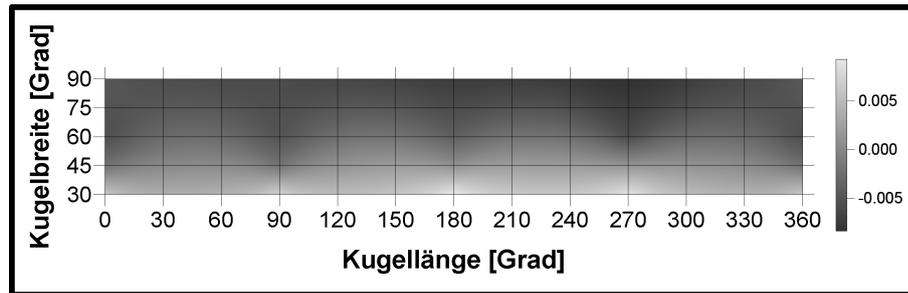


Abbildung 14: Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung in die Nordhalbkugel von 126 Sensoren (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert aller Sensoren. Der Variationskoeffizient der Richtungscharakteristik für alle Sensoren und Einkopplungswinkel der nördlichen Hemisphäre beträgt 2,0 %.

pro Meridian in Position gebracht werden. Es wurden zwei der o.g. LI-190SZ Quantensensoren für den Vergleich herangezogen. Für einen Feldvergleich wurden diese beiden Sensoren neben zwei beliebig ausgewählten sphärischen Sensoren unterhalb der Buchenkrone montiert. Sie wurden im Abstand von 20 cm von den sphärischen Sensoren auf identischer Höhe waagrecht befestigt. Die Messwerte wurden anhand eines LI-COR LI-1000 Datenloggers als zehn Minuten Mittelwerte aufgezeichnet. Der Zeitraum der Vergleichsmessungen erstreckte sich vom 14.09. – 12.10.2005 und umfasste sowohl bewölkte (OVC) als auch wolkenlose (CS) Tage. Der Vergleich der Einkopplungseigenschaften im Freiland erfolgt mit einem weiteren Quantensensor, der über dem Bestand dauerhaft montiert ist, und den sphärischen Sensoren über dem Bestand. Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen werden im Kap. 3.3.1 dargestellt und diskutiert.

3.2 Experimenteller Aufbau

Die kalibrierten Messfühler bestehen, wie in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben, aus Sensorköpfen aus geschliffenen opaquen POM-Kunststoffkugeln (10 mm Durchmesser). Die 600 μm dicken Quarzglasfasern sind in einer passgenauen Bohrung in 4,6 mm Tiefe mit den Kugeln mechanisch befestigt. Die mit Nylon-Coating und PVC-Schlauch geschützten Glasfasern werden mit 3 mm Nylonseilen zugentlastet in einen am Bestandesboden befindlichen Messwagen geführt. Die Durchführung der LWL durch die Außenwand des Messwagens wird mit einer S-förmigen Röhre (aus PVC-Rohrstücken mit 10 cm Durchmesser) realisiert. Im temperaturgeregelten Wagen münden die LWL in eine sonderangefertigte Aluminiummatrix mit Gitterkonstante 5 mm. Die Matrix enthält 21×21 dieser Bohrungen und bietet somit Raum für 441 LWL. Die 126 bzw. nach Erweiterung 130 Glasfaserenden dieser Anlage sind in sieben Reihen der Matrix mit Silikon eingegossen. Ein Vielkanal-Spektrometer, das in einer kompakten Einheit auf einem Hochpräzisions-Positioniertisch montiert

ist, bildet das Kernstück der Anlage (siehe Abb. 15). Es wird mit dem o.g. Kreuztisch in die exakte Position zu den ortsfesten Faserenden gebracht und misst sequentiell die dort ankommende Strahlung. Die erhobenen Daten werden schließlich zur Messwerterfassung auf den Steuerungs-PC geleitet. Da für die Hardwareansteuerung und Messung nur einzelne und zum Teil unvollständige Programmmodule vorlagen, musste eine Software speziell entwickelt werden. Die Softwareentwicklung erfolgte mit der Programmiersprache Delphi 6.0. In den folgenden Kapiteln sollen nun die einzelnen noch nicht beschriebenen Komponenten der Strahlungsmessanlage genauer betrachtet werden.

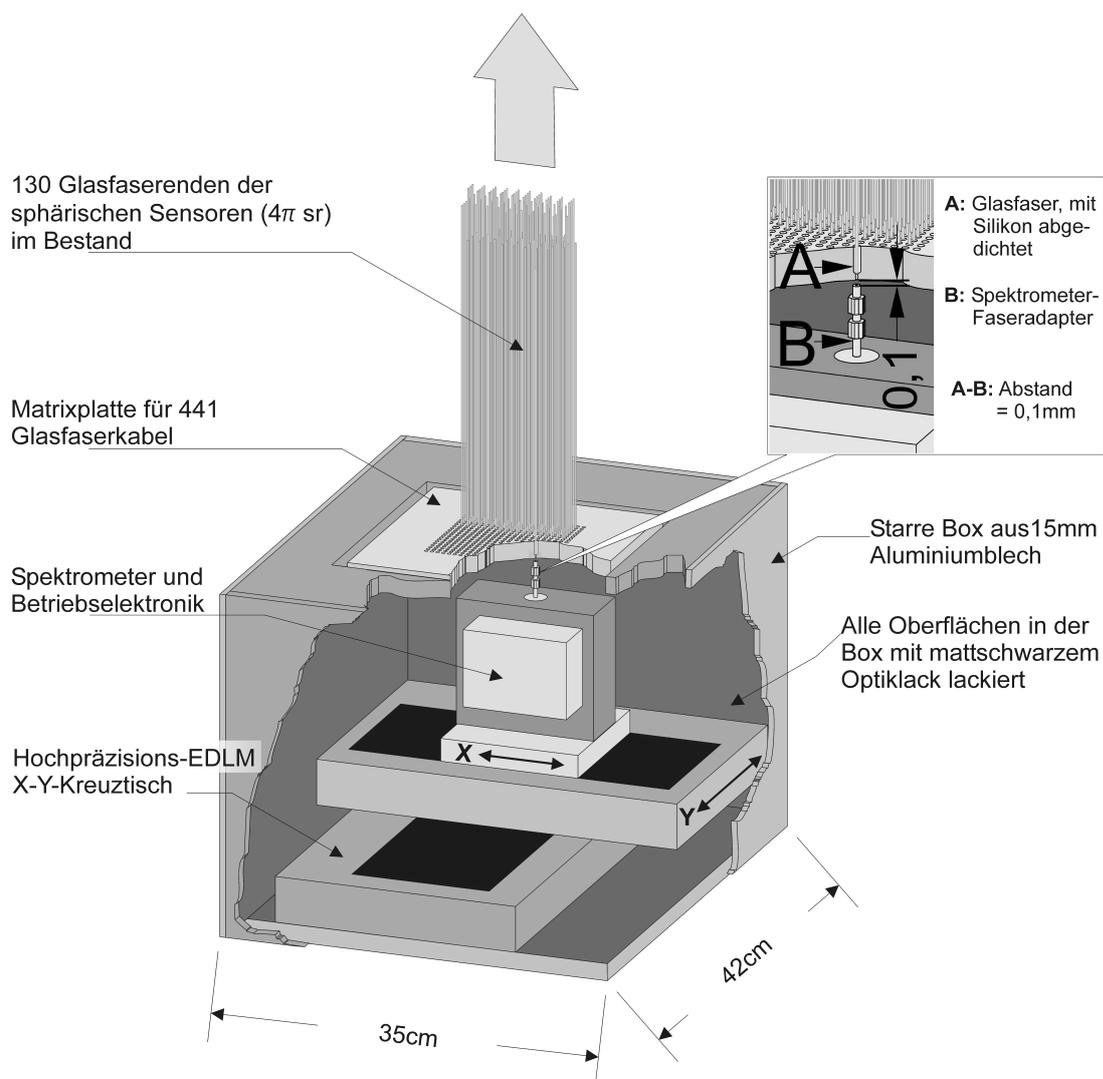


Abbildung 15: Schematische Darstellung der zentralen Messeinheit mit Spektrometer, X-Y-Positioniertisch, Gehäuse mit integrierten Multiplexer und Glasfaserenden. Die Schnittstelle der Strahlungseinkopplung zwischen Faseradapter des Spektrometers und Glasfaser ist vergrößert dargestellt [aus Leuchner et al., 2005].

3.2.1 Multi-Channel-Spektrometer-Modul

Zur spektralen Messung der solaren Strahlung im Bestand wurde das quasi-monolithische Diodenarray MCS-Modul mit 1024 Pixeln der Firma Zeiss verwendet (Abb. 16, Tab. 3), mit dem auch die Kalibrierung der Sensoren durchgeführt wurde (siehe Kapitel 3.1.2). Der Messbereich des Spektrometers liegt zwischen 190 nm und 1100 nm mit einem spezifizierten Bereich zwischen 215 nm und 1020 nm und einer spektralen Auflösung von 0,8 nm. Die absolute Wellenlängengenauigkeit liegt bei $< 0,3$ nm, die Reproduzierbarkeit bei $< 0,1$ nm. Ein Querschnittswandler mit 0,5 mm Durchmesser und einer numerischen Appertur von 0,2 dient als optischer Eingang. Die Einkopplung der Strahlung erfolgt über einen speziell konfektionierten Faseradapter mit einem Öffnungsquerschnitt von 0,6 mm. An beiden Enden ist ein SMA-Stecker angebracht, mit dem eine nahezu verlustfreie Verbindung zum optischen Eingang des Spektrometers gewährleistet ist. Die Strahlungsverluste beim Übergang von Faseradapter und Querschnittswandler sind sehr gering und wurden beim Kalibriervorgang berücksichtigt. Die eingekoppelte Strahlung wird auf ein abbildendes, konkaves Gitter geleitet, das als disperses Element dient und somit Linsen und Hohlspiegel für die Strahlenbündelung überflüssig macht [REITMAYER, 2000]. Vom Gitter wird die Strahlung auf eine Diodenzeile mit 1024 Pixeln (Hamamatsu Typ S3904-1024Q) geleitet. Dort kann das komplette Spektrum in Sekundenbruchteilen simultan erfasst werden. Alle Bauteile des Spektrometers sind fest miteinander verfügt. Das aus einem Keramikkörper bestehende Spektrometer-Modul bildet damit eine thermisch stabile, robuste und dauerjustierte quasi-monolithische Einheit.

Die Ansteuerung und das Auslesen des Diodenarrays vom PC erfolgt über ein PCI-Interface (PD-PCI01V1, tec5 Sensorik und Systemtechnik GmbH), die mit der Frontendelektronik (FEE-HS BE) des Spektrometers verbunden ist. Somit können über die entsprechend entwickelte Spezialsoftware Befehle und Daten des Messwertersfassungsprogramms an die Betriebselektronik des Spektrometers übermittelt, eine Messung initiiert, ausgewertet und an den PC-Speicher weitergeleitet werden.

3.2.2 Hochpräzisions-Positionierung

Das eben beschriebene MCS-Modul ist als kompakte Einheit mit einem hochpräzisen Kreuztischsystem verbunden. Das Positioniersystem besteht aus zwei miteinander gekoppelten Präzisionsmesstischen mit elektrodynamischen Linearantrieben (PMT160-100-EDLM01, Fa. Feinmess Dresden GmbH). Diese positionieren jeweils in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen. Die Verfahrswege in X- und Y-Richtung betragen je 100 mm bei einer maximalen Verfahrgeschwindigkeit von 200 mm/s und einer maximalen Beschleunigung von $1,5 \text{ m/s}^2$. Die Reproduzierbarkeit der Positionierung liegt für beide Richtungen bei $0,5 \mu\text{m}$. Die Positioniergenauigkeit über den gesamten Verfahrbereich in X- und Y-Richtung liegt bei $2 \mu\text{m}$ (siehe Tab. 4).

Technische Eigenschaften	
Abmessungen	140 mm × 105 mm × 75 mm
Gewicht	ca. 600 g
optischer Eingang	Querschnittswandler: 0,5 mm Durchmesser, NA = 0,2, gefasst in SMA Stecker
Gitter	Flat-field, 248 l/mm (im Zentrum)
max. Spektralbereich	190 nm – 1100 nm
spezifizierter Spektralbereich	215 nm – 1020 nm
Diodenanzahl im Array	1024
spektraler Pixelabstand	ca. 0,8 nm
absolute Wellenlängengenauigkeit	< 0,3 nm
Reproduzierbarkeit	< 0,1 nm
Temperaturdrift	< 0,005 nm/K
Empfindlichkeit	ca. 10^{12} - 10^{13} Counts/Ws
Streulicht	0,1 % bei 240 nm
Rauschen	< 2 Counts Standardabweichung

Tabelle 3: Technische Eigenschaften des Multi-Channel-Spektrometer-Moduls

Technische Eigenschaften	
Verfahrweg	100 mm
max. Verfahrgeschwindigkeit	200 mm/s
max. Beschleunigung	1,5 m/s ²
Reproduzierbarkeit	0,5 μm (20 °C ± 0,2 °)
Positioniergenauigkeit (gesamter Verfahrbereich)	2 μm (20 °C ± 0,2 °)
Encodersignale	Rechtecksignale RS422 mit Periodenlänge 400 nm
Encoderauflösung	0,1 μm
Encodergenauigkeit	1 μm (20 °C ± 0,2 °)

Tabelle 4: Technische Eigenschaften des Hochpräzisions-Positioniersystems

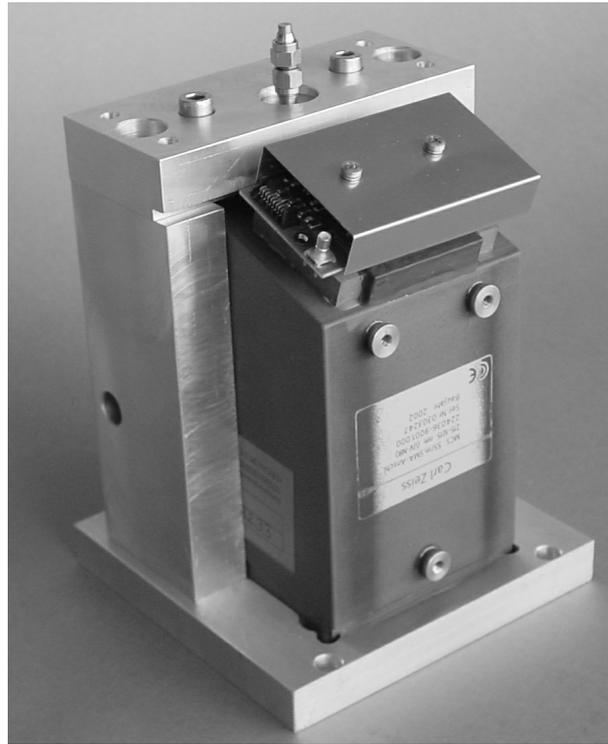


Abbildung 16: Quasi-monolithisches Diodenarray Multi-Channel-Spektrometer-Modul mit 1024 Pixeln der Firma Zeiss. Der spezifizierte Messbereich liegt zwischen 215 nm und 1020 nm mit einer spektralen Auflösung von 0,8 nm.

Zur Überprüfung der Positioniergenauigkeit und der Langzeitstabilität der Positionierung wurden in der Matrix (siehe Kapitel 3.2.3) zusätzlich zu den LWL sechs Leuchtdioden installiert. Die fixierten Dioden emittieren bei konstanten 9 V Gleichspannung gleichmäßig Strahlung im Rotbereich. Anhand dieses konstanten Wertes ist es möglich, die Positionierung durch die elektrodynamischen Linearantriebe zu überprüfen und jegliche Abweichungen anderer Art zu detektieren. In Abb. 17 ist ein Scan ($10\ \mu\text{m}$ Raster) der emittierten Strahlungsmenge an den Positionen einer der Leuchtdioden dargestellt. Es wird deutlich, dass der aus der Matrix austretende Strahlungskegel sehr homogene Ausbreitungscharakteristika aufweist. Das Maximum im Zentrum des Scans liegt bei der exakten Überdeckung des Faseradapterquerschnitts mit der Fläche der Leuchtdiode bzw. Glasfaser. Es handelt sich dabei nicht um ein punktuell Maximum, sondern vielmehr um einen maximalen Wertebereich mit einem Durchmesser von ca. $10\ \mu\text{m}$ bei einem Fehler von $< 0,1\%$. Ein Fehler von 1% tritt erst bei einer Positionierungsabweichung von $> 250\ \mu\text{m}$ vom Maximum auf. Der Durchmesser der Quarzglasfasern beträgt $600\ \mu\text{m}$, die Positioniergenauigkeit der Linearantriebe liegt bei $< 2\ \mu\text{m}$. Der aus der Positionierung resultierende Intensitätsfehler liegt bei $< 0,1\%$ und kann daher bei der Messung vernachlässigt werden. Die Langzeitstabilität der Positionierung wurde über einen Zeitraum von einem Jahr getestet. Hierfür sind zwei der Leuchtdioden in den Messzyklus integriert und liefern

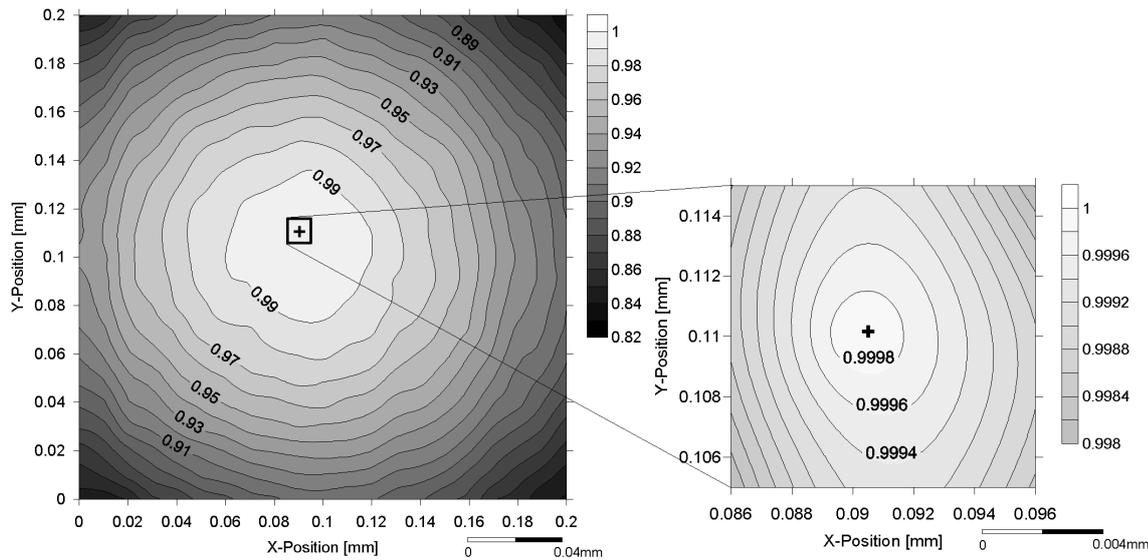


Abbildung 17: Scan ($10\ \mu\text{m}$ Raster) der emittierten Strahlung einer Leuchtdiode an der Matrixposition $X = 80,5 / Y = 92,17$ (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt ist der relative Anteil der emittierten Strahlung vom Maximum.

Informationen über etwaige Abweichungen der Positioniergenauigkeit. Nach einem Jahr kontinuierlichem Messbetrieb mit kurzen Unterbrechungen konnten keine Abweichungen festgestellt werden.

3.2.3 Hochpräzisions-Matrix

Die Glasfaserenden sind zur Messung der PFR durch das Spektrometer in einer speziell für diese Anwendung angefertigten Hochpräzisions-Matrix aus Aluminium fixiert. Den Grundbaustein der Matrix bildet ein $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ großes Aluminiumblech. Zentriert befinden sich auf einer Fläche von $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ die 441 Stufenbohrungen (21×21 Reihen) zur Fixierung der LWL. Die $100\ \text{mm}$ Seitenlängen wurden von der maximalen Verfahrenlänge der Positioniertische vorgegeben. Die Stufenbohrungen haben bis $12\ \text{mm}$ Tiefe einen Durchmesser von $3\ \text{mm}$ und verjüngen sich dann auf einen Durchmesser von $0,60\ \text{mm}$ (siehe Detailausschnitt in Abb. 15). Der Abstand zwischen den einzelnen Bohrmittelpunkten beträgt $5\ \text{mm}$. Die maximale Abweichung der Positionen vom idealtypischen $5\ \text{mm}$ Raster liegt über die gesamte Länge von $100\ \text{mm}$ bei $< 0,01\ \text{mm}$. Mit Insektennadeln aus Edelstahl wurden zur Erleichterung der Montage der LWL alle Bohrungen auf einen Durchmesser von $0,63\ \text{mm}$ radial in einer Presse aufgeweitet. Um einen gleichmäßig planen Abschluss der Faserenden mit der Matrix zu gewährleisten, wurde eine Plexiglasplatte als Justierhilfe fest mit der Matrix verbunden und als Anschlag verwendet. Schließlich erfolgte eine Verklebung der LWL mit Silikon, was eine stabile Fixierung garantiert und einen schadensfreien Ausbau der LWL erlaubt.

3.2.4 Räumliche Anordnung der Sensoren im Bestand

Mit dem Ziel einer dreidimensionalen Charakterisierung des Strahlungsklimas auf der Intensivmessfläche Kranzberger Forst wurde für die räumliche Anordnung der Befestigungsseile ein reguläres Raster mit einer Gitterkonstante von ca. 5 m gewählt. Abb. 18 zeigt einen Grundriss der Intensivmessfläche Kranzberger Forst mit den Positionen der 25 Sensitiveile. Das regelmäßige Gitter von 5 m wurde lediglich an wenigen Stellen auf Grund von Biomasse und Gerüst geringfügig verfehlt, so dass man von einer annähernd rasterförmigen Anordnung sprechen kann.

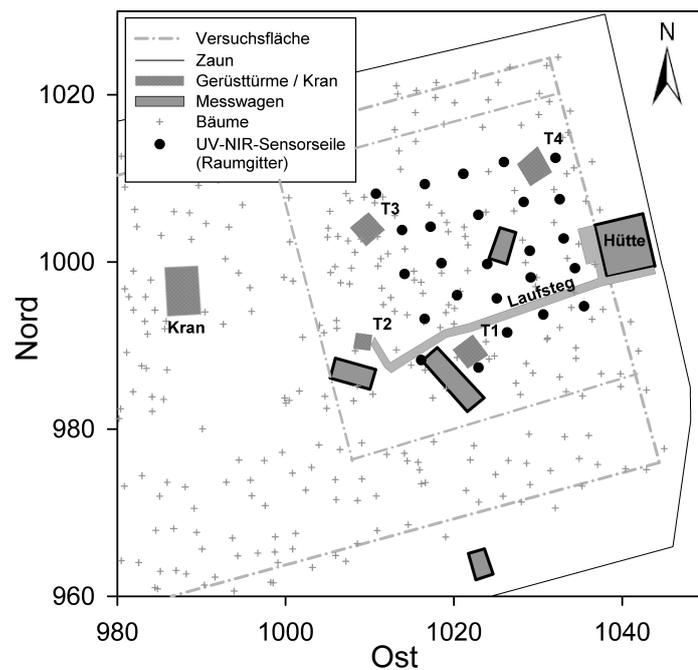


Abbildung 18: Positionen der 25 Vertikalprofile innerhalb der Intensivmessfläche im Kranzberger Forst (Vermessung der Seilpositionen: J. Zander, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz)

Bei Betrachtung der vertikalen Anordnung ist zu erkennen, dass die Sensoren in sechs Ebenen montiert sind. Über bzw. in der Krone befinden sich fünf Ebenen mit einem vertikalem Abstand von 3 m zwischen den Sensoren. Diese Ebenen befinden sich auf 26 m, 23 m, 20 m, 17 m und 14 m, eine zusätzliche Basisebene liegt auf 3 m Höhe über Grund. In Tab. 5 ist die Aufteilung der Sensoren auf die sechs Ebenen dargestellt. Zusätzlich wurden in 32 m Höhe drei weitere Referenzsensoren über dem Bestand angebracht. Ein zusätzlicher Sensor wurde für eine Anwendung eines Kooperationsprojekts neben eine Ansaugstelle eines Ozonmessgerätes in 17 m Höhe montiert.

Von den zehn Sensoren, die in 26 m Höhe montiert sind, wurden die fünf als Referenzsensoren über dem Bestand herangezogen, die am weitesten von Biomasse entfernt

Ebene	Anzahl der Sensoren
6 (26 m / 32 m)	10 / 3
5 (23 m)	25
4 (20 m)	25
3 (17 m)	17
2 (14 m)	25
1 (3 m)	25
Gesamtzahl	130

Tabelle 5: Verteilung der Strahlungssensoren auf die sechs vertikalen Ebenen

sind und somit der geringsten Beeinflussung durch Reflexion ausgesetzt sind. Ab April 2005 dienten die drei zusätzlich installierten Sensoren in 32 m Höhe als Referenz. Diese Sensoren, die in ihrer Eigenschaft als raumintegrierende Messfühler auch die Strahlung des unteren Halbraumes einkoppeln, sind ebenso gewissen Variationen im Reflexionsverhalten der unter ihnen befindlichen Vegetation unterworfen. Dies geschieht allerdings in sehr geringem Maße, was durch Variationskoeffizienten in der Größenordnung von 3–6% im Tagesmittel für die fünf ausgewählten Sensoren in 26 m Höhe und 0–3% für die drei später installierten Sensoren bestätigt wird. Die Abweichungen sind nicht nur auf Variationen im Reflexionsverhalten der Vegetation, sondern in gleichem Maße auf die Richtungsabhängigkeit (siehe Kapitel 3.1.3), dem Fehler bei der Bestimmung der Kalibrierfaktoren (Kapitel 3.1.2), der Einkopplung der Strahlung in das Spektrometer sowie der Messungenauigkeit des Spektrometers zurückzuführen.

Im Verlauf der Messungen wurden 28 Sensoren beschädigt. Der Schaden trat vor allem durch Stürme im Spätherbst auf, bevor die Montage der Polyethylen-Schutzhüllen erfolgte. Diese Sensoren wurden abgebaut, repariert, rekali­briert und zu Beginn der Messperiode im Frühjahr wieder montiert.

3.2.5 Messwerterfassung und Datenverarbeitung

Die Integrationszeit des Spektrometers wurde auf 500 ms pro Messung festgelegt, um einerseits niedrige Strahlungsintensitäten im Bestand mit ausreichender Genauigkeit und andererseits hohe Werte über dem Bestand an sonnigen und leicht bewölkten Tagen innerhalb des Messbereichs des Spektrometers zu erfassen. Somit beträgt die Zeit eines Messzyklus mit 132 Messungen (126 Sensoren, 3 Referenzsensoren, 1 Sensor am Ozonmonitor, 2 Leuchtdioden) 2:15 Minuten. Aufgrund der zeitlich, räumlich und spektral hochaufgelösten Messungen ergeben sich bei diesem Messzyklus täglich, bei einer Messdauer von 04:00–22:00 h MEZ, Datenmengen von etwa 150 Megabyte. Diese Rohdaten werden im ASCII-Format semikolon-separiert für jeden Messzyklus in einer eigenen Datei abgelegt und zur Sicherung auf DVD-Rohlinge gebrannt. Die Auswertung der Daten erfolgt an einem separaten Rechner, auf dem eine weitere Sicherung auf Festplatte erfolgt. Alle Auswertungsprogramme und Programme zur

Plausibilitätskontrolle wurden mit der Programmiersprache Delphi 6.0 erstellt und ermöglichen eine zeitsparende, flexible Auswertung und Plausibilisierung der Daten. So kann unter anderem wahlweise und kombiniert nach integrierten Spektralbereichen oder einzelnen Wellenlängen, dem gesamten Spektrum, einzelnen Zeitpunkten oder Zeitperioden, einzelnen Vertikalprofilen oder Horizontalverteilungen und physiologischen, energetischen oder photometrischen Einheiten ausgewählt werden. Die entsprechenden spektralen Kalibrierfaktoren jedes Sensors werden aus den Kalibrierdateien automatisch eingerechnet.

3.3 Ergebnisse und Diskussion der Messungen

Die Messanlage wurde am 13.10.2004 in Betrieb genommen. Seit diesem Zeitpunkt werden kontinuierlich für alle Sensoren die Messwerte erhoben. Über die Wintermonate (Dezember – Februar) wurde aus Gründen der Reparatur und des Schutzes lediglich mit 35 Sensoren gemessen.

Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse dargestellt werden, die mit der oben beschriebenen neuartigen Anlage gemessen wurden. Der Zeitraum der Messungen umfasst phänologisch betrachtet den Zeitraum eines kompletten Jahres. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte immer unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rahmenbedingungen im Hinblick auf klimatisch-meteorologische Aspekte (wolkenlos oder bewölkt), das phänologische Stadium bzw. die Austriebs- und Seneszenzstufe (vor und nach Austrieb, volle Belaubung, vor und nach Laubfall der Buche) und die Baumart (Fichte oder Buche). Ziel ist die umfassende Charakterisierung der spektralen Strahlungsverteilung während einer Vegetationsperiode und die Untersuchung der qualitativen und quantitativen Veränderungen des Strahlungsklimas durch Austrieb und Laubfall.

3.3.1 Vergleich zwischen Planar- und sphärischen Sensoren

Die Notwendigkeit der Verwendung von raumintegrierenden Sensoren in der Pflanzenbiologie wurde bereits in Kap. 3.1 erläutert. In Kap. 3.1.3 wurde ausführlich die Richtungscharakteristik der in dieser Arbeit entwickelten sphärischen Sensoren beschrieben. Die meisten experimentellen Strahlungsuntersuchungen in der Agrar- und Forstmeteorologie verwenden bisher allerdings kosinusgetreue Planarsensoren wie z.B. den Quantensensor von LI-COR (LI-190SZ Quantum Sensor). Aus diesem Grund müssen zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse, vor allem in ähnlichen Anwendungsbereichen, die Einkopplungseigenschaften beider Sensortypen miteinander verglichen werden. Hierfür wurden sowohl im Kalibrierlabor als auch im Freiland über und unter der Baumkrone Vergleichsmessungen durchgeführt. Der jeweilige Versuchsaufbau ist im Kap. 3.1.3 beschrieben.

Abb. 19 zeigt die Einkopplungseigenschaften beider Sensortypen unter verschiedenen Einfallswinkeln als Verhältnis von tatsächlich eingekoppelter zu eintreffender direkter PAR. Es können einerseits die Ergebnisse aus der Kalibrierung der sphärischen Sensoren bzw. der LI-190SZ Quantensensoren und zum Vergleich die theoretische Einkopplung für beide Typen unter verschiedenen Einfallswinkeln betrachtet werden. Die Messwerte sind dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung aller sphärischen bzw. der beiden Planarsensoren. Pro Sensor wurde jeder Winkel in vier Meridianen gemessen. Eine Messung des unteren Halbraumes wurde für die Planarsensoren nicht durchgeführt, da aus diesem Halbraum der Wert immer null ist (für sphärische Sensoren bleibt er eins). Während die sphärischen Sensoren aus allen Raumwinkeln die einfallende Strahlung komplett einkoppeln, messen die kosinuskorrigierten LI-COR Sensoren nur bei senkrechter Einstrahlung die komplette Strahlungsintensität. Bei allen anderen Winkeln gilt das Kosinusetz von LAMBERT. Der eingegraute Bereich hebt die unterschiedlichen Einkopplungseigenschaften hervor. Dabei fällt auf, dass gerade bei flachen Einfallswinkeln der Unterschied zwischen den beiden Sensortypen sehr groß wird. Beide Typen weichen in der Messung kaum von der theoretischen Einkopplung ab.

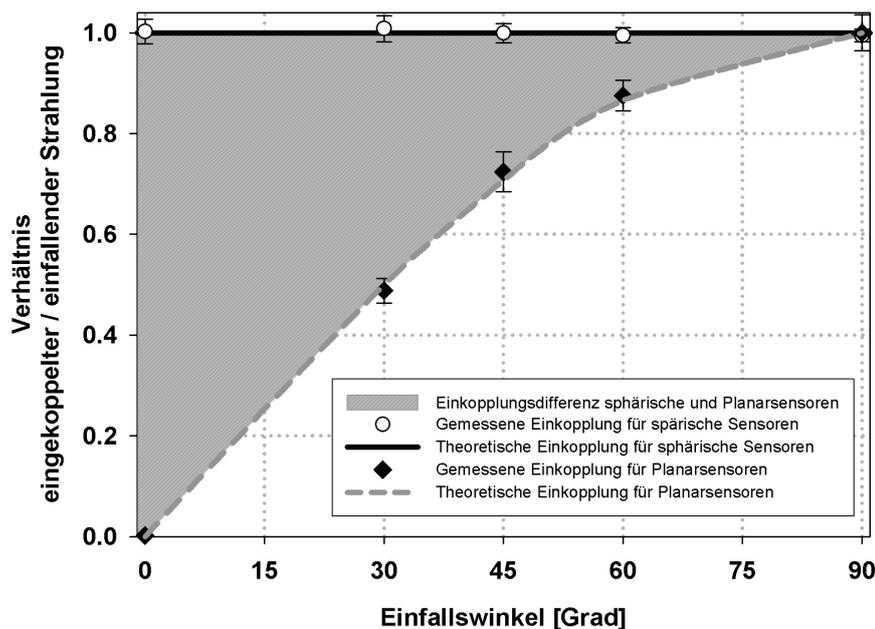


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Anteils tatsächlich eingekoppelter zu eintreffender direkter PAR im Vergleich von LI-COR Quantensensoren (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR Inc., Nebraska, USA) und sphärischen Sensoren unter verschiedenen Strahlungseinfallswinkeln des oberen Halbraums. Die kosinuskorrigierten Planarsensoren von LI-COR weisen eine Winkelabhängigkeit auf, die Kugelsensoren sind bei der Strahlungseinkopplung aus allen Raumrichtungen winkelunabhängig.

In Abb. 20 ist das Verhältnis zwischen PPFR und PPF, gemessen als das Einkopplungsverhältnis zwischen den sphärischen und den Planarsensoren, unter natürlichen Bedingungen dargestellt. Das Verhältnis variiert unter gleichmäßig bewölktem Himmel (gemessen am 27.09.2005) im Tagesverlauf sowohl über dem Bestand als auch am Bestandesboden nur in geringem Maße. Dabei koppeln die sphärischen Sensoren in etwa die doppelte Photonenzahl ein, wobei die Werte am Bestandesboden etwas niedriger sind als über dem Bestand. Der Anstieg des Verhältnisses bei niedrigen Sonnenhöhen läßt sich auf vermehrt seitlich einfallende diffuse Strahlung zurückführen, die in deutlich größerem Maße von der sphärischen Fläche detektiert wird. Der doppelte Einkopplungswert über dem Bestand entspricht dem theoretischen Wert bei isotropischer (diffuser) Strahlung aus dem oberen Halbraum (2π sr). Da über dem Bestand bei OVC-Bedingungen annähernd Isotropie im oberen Halbraum vorliegt und aus dem unteren Halbraum lediglich die relativ niedrige Bestandsalbedo hinzukommt, sind die Werte plausibel. Messwerte von BJÖRN UND VOGELMANN [1996] über dem Bestand und unter der Bestandskrone liegen ebenfalls bei einem Einkopplungsverhältnis von ca. zwei.

Der Tagesverlauf des Verhältnisses bei wolkenlosen Bedingungen (22.09.2005) weist ein Minimum bei höchstem Sonnenstand und Maxima bei geringen Sonnenhöhen auf. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der kompletten Einkopplung der direkten Strahlung im Falle der sphärischen Sensoren und der kosinusgetreuen Abnahme der Einkopplung bei niedrigen Einfallswinkeln im Falle der Planarsensoren (siehe Abb. 19). Etwa 30 Minuten vor Sonnenuntergang erreicht die PPFR fast den sechsfachen, kurz nach Sonnenaufgang den vierfachen Wert der PPF. Kurz vor Sonnenuntergang verringert sich das Einkopplungsverhältnis. Durch die lange Wegstrecke, die die Strahlung in der Atmosphäre durchqueren muss, und der damit verbundenen erhöhten Extinktion sinkt der direkte Strahlungsanteil und es wird relativ mehr diffuse Strahlung gemessen, wodurch das Verhältnis etwas absinkt. BJÖRN UND VOGELMANN [1996] begründen den Abfall kurz vor Sonnenuntergang mit dem Einfluss von Aerosolen auf die Strahlung. Auf eine Darstellung des Tagesverlaufs bei wolkenlosem Himmel am Bestandesboden wurde verzichtet, da die Kurve derjenigen bei bewölktem Himmel gleicht.

Die Messungen stimmen ziemlich gut mit Werten von BJÖRN UND VOGELMANN [1996] überein. Der Tagesverlauf ist nahezu identisch mit sinkenden Werten bis zum Sonnenhöchststand und steigenden Werten bis zum Maximum gegen Ende des Tages und dem Gefälle kurz vor Sonnenuntergang. Der Maximalwert beträgt etwa fünf und der Minimalwert zum solaren Mittag ca. 1,5. Der niedrigere Wert zum jeweiligen Höchststand der Sonne im Vergleich mit dieser Studie läßt sich aus den unterschiedlichen Sonnenhöhen erklären. Bei der Studie von BJÖRN UND VOGELMANN [1996] beträgt die maximale Sonnenhöhe knapp 60° , am betrachteten wolkenlosen Tag in dieser Arbeit liegt sie bei etwas über 42° . Die Differenz von knapp 18° im Einfallswinkel der direkten Strahlung auf die Fläche des Planarsensors und die damit verbundene niedrigere (kosinusabhängige) Einkopplung bei niedrigerem Sonnenstand ist für die höheren Werte im Einkopplungsverhältnis verantwortlich. Auch spielen

Unterschiede im Aerosolgehalt der Atmosphäre eine Rolle für das vorhandene Verhältnis zwischen PFR und PPF, auf die im Zusammenhang dieser Betrachtung nicht näher eingegangen werden soll.

Die theoretischen Betrachtungen der Strahlungseinkopplungsdifferenzen zwischen sphärischen und Planarsensoren unter verschiedenen Bedingungen (direkte Strahlung senkrecht, direkte Strahlung aus Winkel x , diffuse Strahlung aus dem oberen Halbraum, diffuse Strahlung aus dem gesamten Raum) werden bei BJÖRN UND VOGELMANN [1994] ausführlich dargestellt.

Neben den teilweise deutlichen Unterschieden in der Strahlungsquantität, machen sich je nach Einkopplungsrichtung auch Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung bemerkbar. SMITH ET AL. [1990] vergleichen spektrale Messungen aus verschiedenen Einstrahlungswinkeln und stellen deutliche Unterschiede in der spektralen Charakteristik der gemessenen Strahlungswerte fest.

3.3.2 Strahlungsverteilung im Bestand

In Kap. 1 wurde die große Bedeutung der Strahlung für das Wachstum und die Konkurrenzsituation von Pflanzen in Beständen erläutert. Eine genaue Kenntnis über die räumliche Verteilung des spektralen Strahlungsangebotes ist dabei entscheidend. Eine ebenso wichtige Rolle spielt die zeitliche Komponente sowohl im Sinne von Veränderungen innerhalb eines Tages als auch im Jahresverlauf. Zahlreiche Untersuchungen wie die von WIRTH ET AL. [2001], PALVA ET AL. [1998b], BALDOCCHI ET AL. [1986], MITSCHERLICH [1981] und REIFSNYDER ET AL. [1971] (siehe auch Kap. 1.2), um nur einige Beispiele zu nennen, haben sich mit der räumlich-zeitlichen Dynamik der PAR beschäftigt. Die gleichzeitige Berücksichtigung der spektralen Zusammensetzung wurde nur in wenigen Experimenten genauer untersucht [COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ENDLER, 1993, OLESEN, 1992, LEE, 1989, MESSIER UND BELLEFLEUR, 1988, SMITH, 1982, HOLMES, 1981, MORGAN UND SMITH, 1981, FEDERER UND TANNER, 1966]. Oftmals fehlte es an der geeigneten räumlichen und zeitlichen Auflösung der Messungen, um die hochvariable Größe Strahlung im Bestand gut charakterisieren und parametrisieren zu können. In allen Studien wurden die Messungen mit Planarsensoren durchgeführt, die jedoch nicht das tatsächliche Strahlungsangebot für eine Pflanze messen (siehe Kap. 3.1). Im vorangegangenen Kapitel wurden die Unterschiede dieser Messungen mit den in dieser Arbeit verwendeten sphärischen Sensoren dargelegt. Aus den erwähnten Gründen stellen die folgenden Ergebnisse einen neuen Beitrag zum besseren Verständnis der PFR-Verteilung in einem Mischbestand in räumlich, zeitlich und spektraler Betrachtungsweise dar.

Zunächst soll die Strahlungsverteilung im Bestand anhand der gemessenen Vertikalprofile für den PAR-Bereich betrachtet werden. Exemplarisch sind in den Abb. 21 und 22 Momentaufnahmen der $PPFR_{rel}$ zu verschiedenen Zeitpunkten abgebildet.

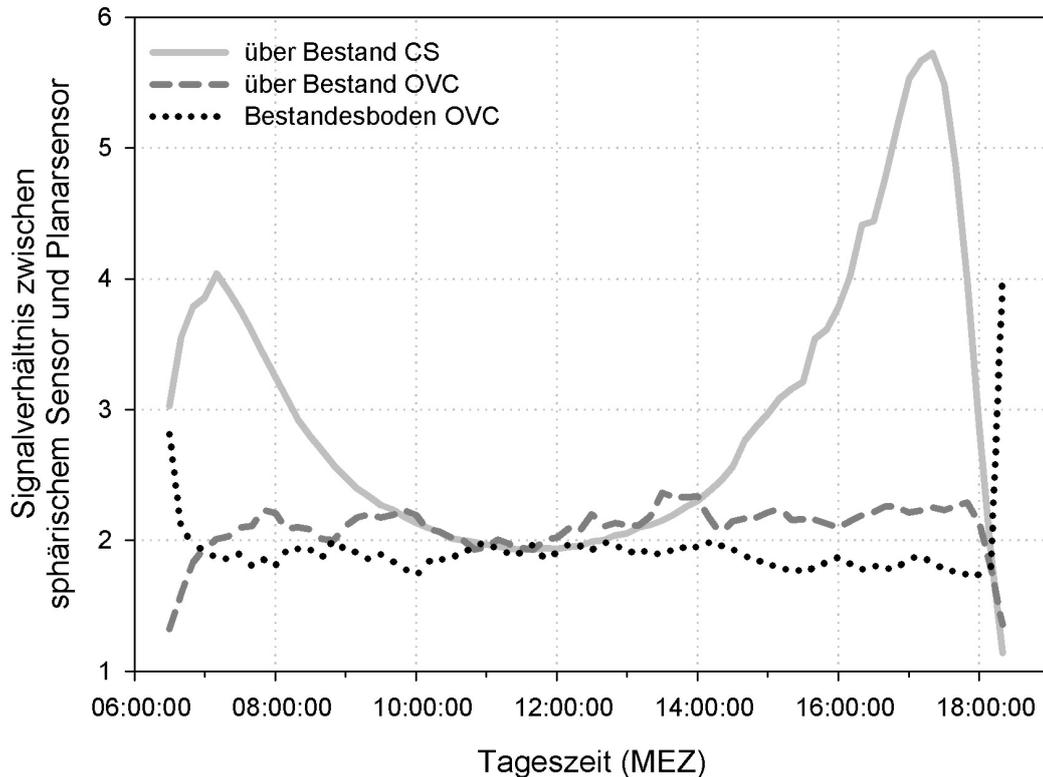


Abbildung 20: Verhältnis zwischen photosynthetischer Photonenflussrate (PPFR) und photosynthetischer Photonenflussdichte (PPFD), gemessen im Vergleich von sphärischen Sensoren zu LI-COR Quantensensoren (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR Inc., Nebraska, USA), über dem Bestand (32 m Höhe) und am Bestandesboden bei bewölktem (OVC, 27.09.2005) und wolkenlosem (CS, 22.09.2005) Himmel. Die Unterschiede des gemessenen Photonenflusses sind insbesondere bei CS-Bedingungen v.a. bei geringer Sonnenhöhe am größten. Bei OVC-Bedingungen über dem Bestand und am Bestandesboden verhält sich das Signalverhältnis über den gesamten Tagesverlauf konstant bei Werten um 2.

Es wird in den beiden Abbildungen zwischen belaubtem (Abb. 21) und unbelaubtem (Abb. 22) Zustand der Buche unterschieden. Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach unterschiedlichen Bewölkungssituationen (CS, OVC) und nach Zuordnung des Profils zur jeweiligen Baumart. Alle Messungen wurden jeweils quasi-simultan um 12:00 h MEZ durchgeführt. Jedes Seil steht für ein Vertikalprofil bestehend aus den Messwerten der beschriebenen sechs Sensorebenen. Die Werte der $PPFR_{rel}$ werden nicht als absolute Höhen, sondern als Abstand zur Kronenspitze dargestellt. Die negativen Werte spiegeln die nach unten gerichtete Betrachtung wider. Auf eine quantitative Beschreibung soll in den nachfolgenden Beispielen verzichtet werden, da aufgrund des Charakters als Momentaufnahme keine allgemeingültigen Aussa-

gen getroffen werden können. Diese können nur durch eine Vielzahl an Messwerten abgeleitet werden, was im weiteren Verlauf noch näher geschildert werden soll.

In beiden Abbildungen fällt auf, dass der größte Anteil der in den Bestand eindringenden PPRF bereits wenige Meter unterhalb der Krone durch Absorptions- und Reflexionsprozesse extinguiert wurde. Zuerst soll die vertikale Verteilung bei vollem Belaubungszustand der Buchen betrachtet werden (Abb. 21). Die geringste Variabilität ist zwischen den einzelnen Profilen in der Buchenkrone unter bewölktem Himmel zu beobachten. Die eintreffende Strahlung wird annäherungsweise nach dem Gesetz von BEER-BOUGER-LAMBERT extinguiert. Erst in den Ebenen am Unterrand der Krone und am Boden kommt es durch zunehmend seitlich einfallende Strahlung und Reflexionsprozesse am Boden zu leicht erhöhten Werten, die jedoch nur geringe Auswirkungen haben. Bei wolkenlosem Himmel ist die Abnahme der $PPFR_{rel}$ größer, da weniger diffuse Strahlung in den Bestand eindringt und die direkte Strahlung bereits bei der ersten Wechselwirkung mit der Biomasse zum großen Teil extinguiert wird [ENDLER, 1993]. Jedoch gelingt es der direkten Strahlung gelegentlich durch Lücken tiefer in die Krone und sogar zum Bestandesboden durchzudringen. Diese Lichtflecken- bzw. Halbschatteneffekte können einen großen Anteil am Strahlungsgehalt für die Schattenkrone und Pflanzen am Boden stellen [ENDLER, 1993]. Das Profil von Seil 43 (Abb. 21 A) ist ein typisches Beispiel für einen derartigen Effekt. Die Strahlungsverteilung in der Fichtenkrone verhält sich entsprechend. Jedoch ist bei bewölktem Himmel eine deutlich höhere Variabilität festzustellen, was auf die komplett andere Wuchsform der Nadelbäume im Vergleich zur Buche zurückzuführen ist. Durch die konische Form der Fichten existieren zwischen den Bäumen insbesondere in den höchsten Bereichen größere Lücken, die es der diffusen Strahlung ermöglichen, in verstärktem Maße von der Seite einzufallen.

Nach dem Laubfall der Buche (Abb. 22) findet man höhere Strahlungswerte in allen Ebenen der Buchenprofile vor. Das Fehlen von Blättern ermöglicht es der diffusen Strahlung von allen Raumrichtungen sowie der direkten Strahlung, je nach Sonnenhöhe, verstärkt in den Bestand einzudringen. Bei den Fichten ist erwartungsgemäß kaum ein Unterschied zu den Profilen bei Belaubung festzustellen. Lediglich am Bestandesboden unter den Fichten sind etwas höhere PPRF zu beobachten, was auf das Fehlen der Buchenblätter und der damit verbundenen erhöhten Flüsse diffuser Strahlung von der Seite zurückzuführen ist.

Durch die wellenlängenselektive Absorption und Reflexion der Photonen an Buchenblättern und Fichtennadeln erfolgt neben der Reduktion der Strahlungsquantität bei zunehmender Kronendurchdringung eine qualitative Veränderung der spektralen Zusammensetzung. In Abb. 23 A sind die spektralen PFR für die sechs untersuchten Ebenen eines Vertikalprofils der Buche am 24.10.2004 um 12:00 h MEZ bei CS-Bedingungen dargestellt. Wie bereits in den Vertikalprofilen mit integralen Werten von PPRF zu beobachten war, nimmt die Strahlungsquantität bei zunehmendem Abstand von der Kronenspitze ab. Lediglich am Bestandesboden tritt eine leichte Erhöhung auf. Die Einkerbungen in den Spektren sind auf atmosphärische Absorp-

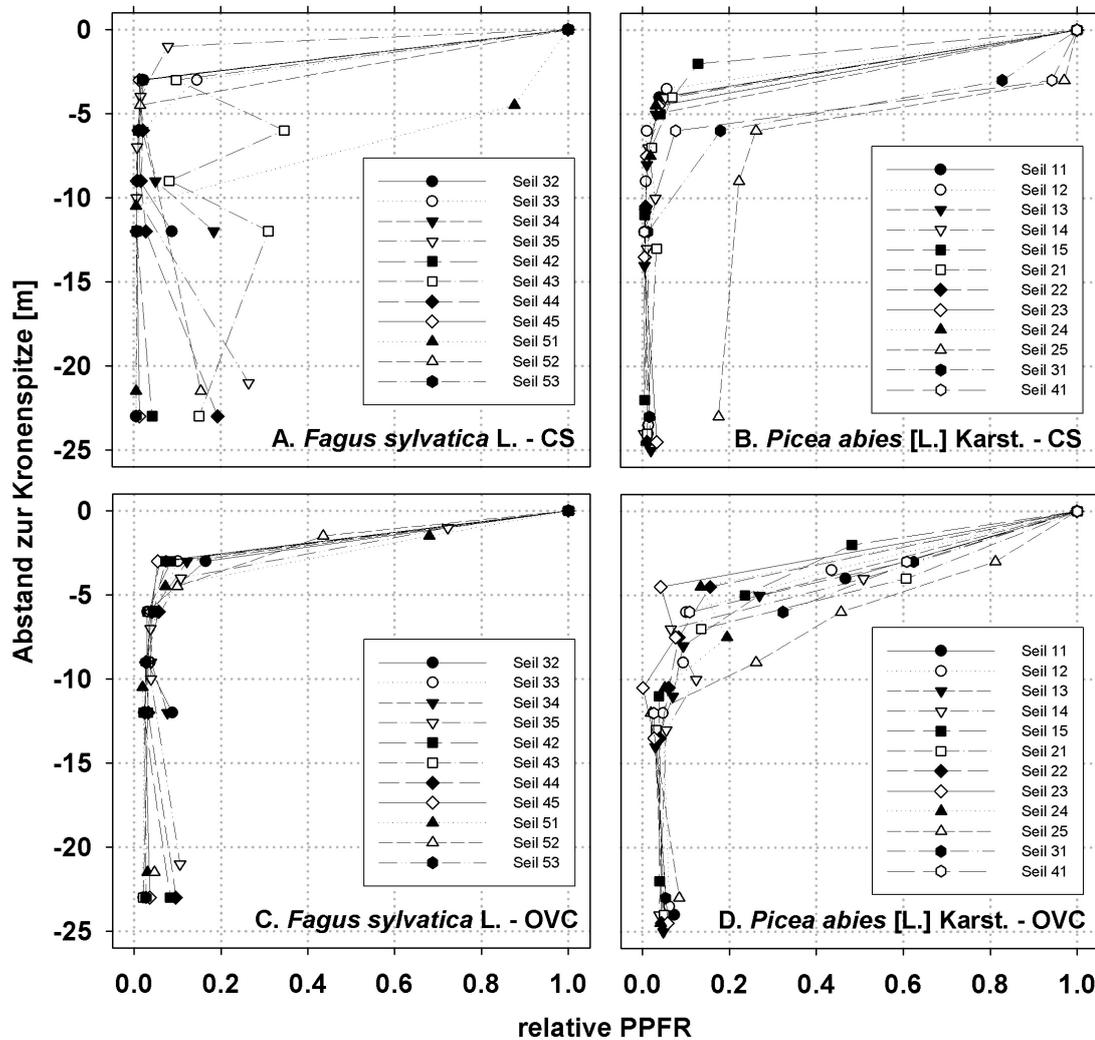


Abbildung 21: Vertikalprofile der relativen Photonenflussrate (PPFR_{rel}) in der Buchen- (A, C) und Fichtenkrone (B, D) am 24.10. (CS; A, B) und 14.10.2004 (OVC; C, D) um 12:00 h MEZ vor dem Laubfall

tionsbanden zurückzuführen. Am deutlichsten kommen die Sauerstoffbande und die Wasserbande bei 760 nm bzw. 940 nm zur Geltung.

Ein Vergleich der spektralen Zusammensetzung kann durch die Betrachtung der relativen spektralen PFR angestellt werden (Abb. 23 B). Dabei werden die Spektren auf den jeweils maximalen Wellenlängenwert normiert. Mit Ausnahme des Spektrums am Bestandesboden findet mit zunehmendem Abstand zur Kronenspitze eine relative Überhöhung des Dunkelrots und nahen Infrarots (NIR: 700 nm – 1000 nm) bei gleichzeitiger Reduktion des photosynthetisch aktiven Bereichs (PAR: 400 nm –

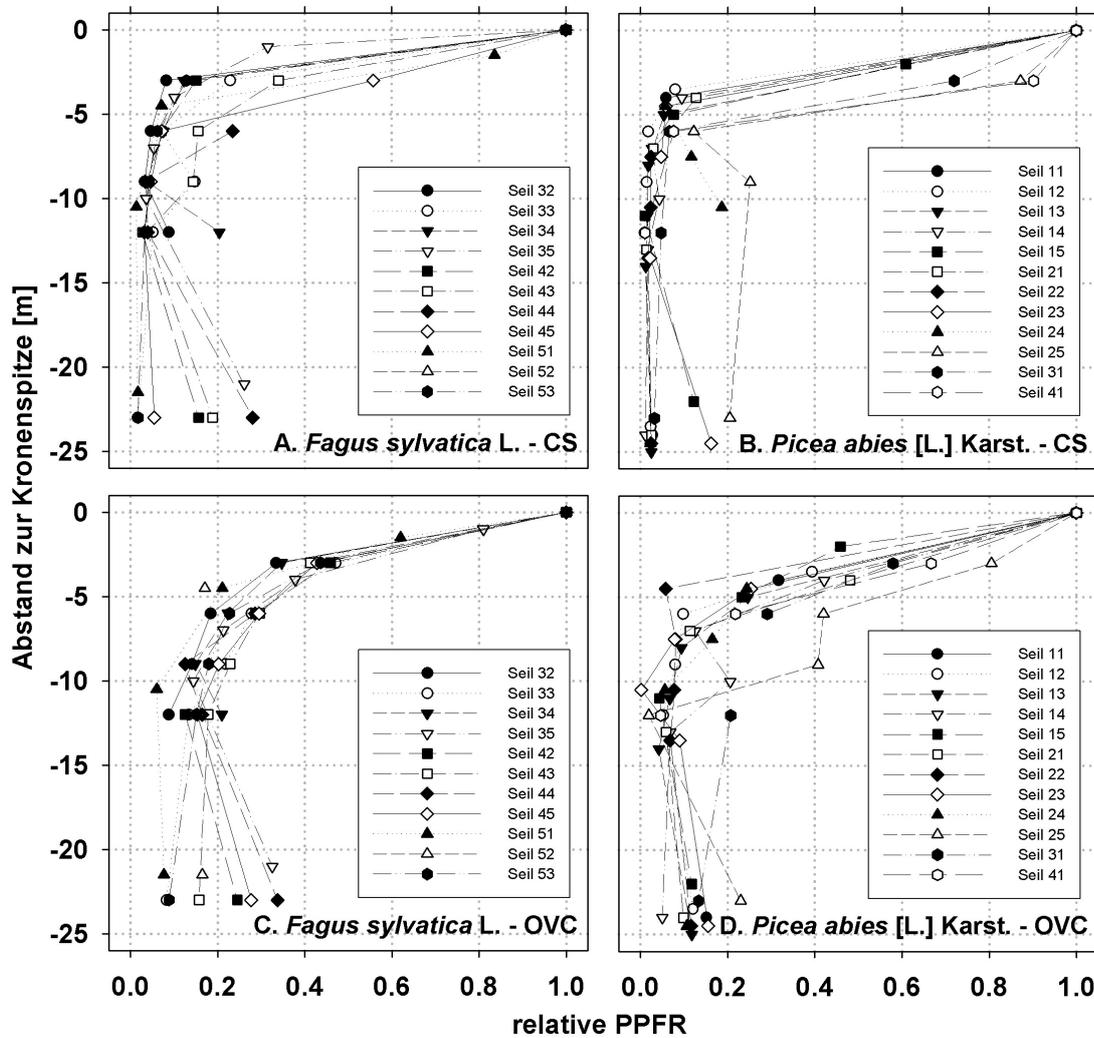


Abbildung 22: Vertikalprofile der relativen Photonenflussrate (PPFR_{rel}) in der Buchen- (A, C) und Fichtenkrone (B, D) am 15.11. (CS; A, B) und 16.11.2004 (OVC; C, D) um 12:00 h MEZ nach dem Laubfall

700 nm) statt. Innerhalb der PAR ist ein kleines, aber bedeutsames Maximum im Grünbereich um 555 nm zu erkennen, das sich für das grüne Erscheinungsbild des Waldes verantwortlich zeigt. Die Veränderung der spektralen Zusammensetzung in den einzelnen Kronenbereichen im Vergleich zum Spektrum über dem Bestand wird durch die Darstellung der relativen spektralen Extinktion aufgezeigt (Abb. 23 C). Deutlich treten die Unterschiede in der größeren Extinktion des PAR- und der geringeren des NIR-Bereichs mit einer Flanke zwischen ca. 700 nm und 800 nm hervor. Bereits innerhalb der ersten Meter unterhalb der Kronenspitze wird der größte Anteil vor allem der PPFR extinguiert. Die Zusammensetzung des Spektrums am Bestan-

desboden (Abb. 23 B), das dem Referenzspektrum über dem Bestand sehr ähnlich ist, ist auf den zusätzlichen Beitrag von Strahlung, die nicht mit Phytomasse wechselgewirkt hat, zurückzuführen [OLESEN, 1992].

Die spektrale Zusammensetzung der Strahlung in der Buchenkrone während der laubfreien Zeit ist in Abb. 23 D dargestellt. Sie entspricht in allen Kronenebenen in etwa der spektralen Verteilung über dem Bestand, da Absorption und Reflexion nur noch an den wellenlängenunabhängig wechselwirkenden Pflanzenteilen (Zweige, Äste und Stämme) [AMMER, 2000] der Buchen stattfindet. Diese werden als annähernd neutrale Filter wirksam und tragen nicht zu einer vermehrten Extinktion im PAR-Bereich v.a. in den Rot- und Blaubereichen bei, wie es bei Belaubung der Fall ist.

Die abgebildeten Spektren unterhalb der Krone stimmen in ihrer Form und Quantität gut mit gemessenen Spektren aus anderen Untersuchungen überein [COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ENDLER, 1993, LEE, 1989, SMITH, 1982, HOLMES, 1981]. Dies gilt auch für die hier nicht dargestellten Spektren der Fichtenkrone.

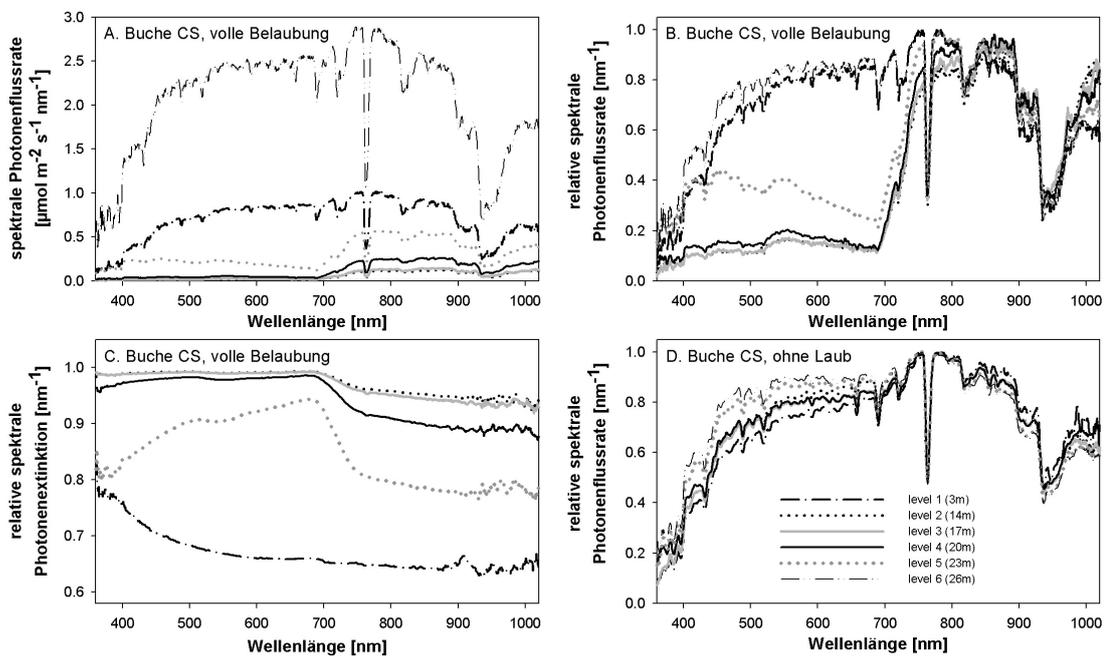


Abbildung 23: Typisches Vertikalprofil (sechs Ebenen) der spektralen Photonenflussrate (A), der relativen spektralen Photonenflussrate (B) und der relativen spektralen Photonenextinktion (C). Das Profil wurde in der Buche am 24.10.2004 um 12:00 h MEZ bei voller Belaubung und wolkenlosem Himmel gemessen. Zum Vergleich die relativen spektralen Photonenflussraten des gleichen Vertikalprofils in unbelaubtem Zustand (D) vom 22.04.2005 12:00 h MEZ.

Aufgrund der hohen Variabilität der Strahlung in einem Bestand dienen diese Momentaufnahmen weniger zur Ableitung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten oder zur Parametrisierung für Modelle. Sie können lediglich exemplarisch einen Eindruck über

die Prozesse vermitteln, die bei der Interaktion der Photonen mit der Biomasse stattfinden und die Variabilität aufzeigen, die bereits ohne Berücksichtigung der Zeitachse auftritt. Mit Hilfe des neuartigen Versuchsaufbaus ist es jedoch möglich anhand vieler Messwerte in hoher Auflösung statistische Größen und Verteilungen zu ermitteln, die eine allgemeingültigere Aussage für einen Fichten-Buchen-Mischbestand zulassen. Zu diesem Zweck sind in den Abb. 24–34 Häufigkeitsverteilungen des Auftretens der relativen PFR für den PAR- und den NIR-Bereich dargestellt. Durch diese Betrachtung können gleichzeitig Aussagen über die Verteilung von Lichtflecken und Halbschatteneffekten getroffen werden. Die temporär starke Erhöhung der PFR spielt eine wichtige Rolle für das Wachstum und die Regeneration des Bestandes [AMMER, 2003, SMITH, 2000, GRANT, 1997].

Dabei erfolgt eine Unterscheidung in vier phänologische Phasen: vor dem Laubaustrieb der Buche (P1), bei vollem Belaubungszustand (P2), kurz vor dem Laubfall (P3) und nach dem Laubfall (P4) der Buche. Dabei handelt es sich um zwei belaubte (P2, P3) und zwei unbelaubte (P1, P4) Stadien mit jeweils hohem (P1, P2) und niedrigem Sonnenstand (P3, P4). In jeder Phase wurde wiederum nach Bewölkungssituation (CS, OVC) und Baumart (Fichte, Buche) unterschieden. Aus den vier Messebenen in der Krone wurde zur genaueren Betrachtung die Ebene 4 (20 m Höhe) in der Schattenkrone ausgewählt. Wegen der großen Bedeutung für die Regeneration des Bestandes wurde die Bodenebene 1 (3 m Höhe) herangezogen. Die restlichen Ebenen (2/3/5) sind nur für die volle Belaubungsphase dargestellt. Ihre statistischen Mittelwerte, Standardabweichungen und Perzentile wurden ergänzend ermittelt und finden in Abb. 35 Verwendung. Es wurden alle gemessenen Werte der nach Fichten- und Buchenzugehörigkeit aufgeteilten Sensoren an den in den Legenden der Abbildungen beschriebenen Tagen zwischen 09:00 h und 15:00 h MEZ herangezogen. Die Auswertungen wurden auf diesen Zeitraum beschränkt, um Einflüsse durch niedrigen Sonnenstand (siehe Kap. 3.3.5) auszuschließen.

Die Abb. 24–34 zeigen die relativen Häufigkeiten von PFR_{rel} in Klassen von 0,01. Der PAR-Bereich ist durch schwarze, der NIR-Bereich durch graue Vertikalbalken gekennzeichnet. Die horizontalen Balken über den Histogrammen liefern Informationen über das arithmetische Mittel, den Median sowie die 10 %- und 90 %- Perzentile für die beiden Spektralbereiche in den entsprechenden Farben. Das jeweilige Messdatum ist den Legenden zu entnehmen. Zu beachten sind die unterschiedlichen Wertebereiche der Abszissen, die der jeweiligen Darstellbarkeit angepasst wurden. Schraffiert hinterlegte Bereiche kennzeichnen aus Gründen der besseren Anschaulichkeit eine zehnfache Überhöhung. Die in Abb. 24 dargestellte Legende für die Farbgebung der Spektralbereiche sowie für die statistischen Parameter gilt ebenso für die Abb. 25–34.

Im Vergleich zu traditionellen Lichtfleckenstudien, die in erster Linie die gerichtete ungestreute direkte Strahlung untersuchen, wird in dieser Arbeit die PFR, also die eintreffende Strahlung aus allen Raumrichtungen betrachtet. Somit soll mehr auf

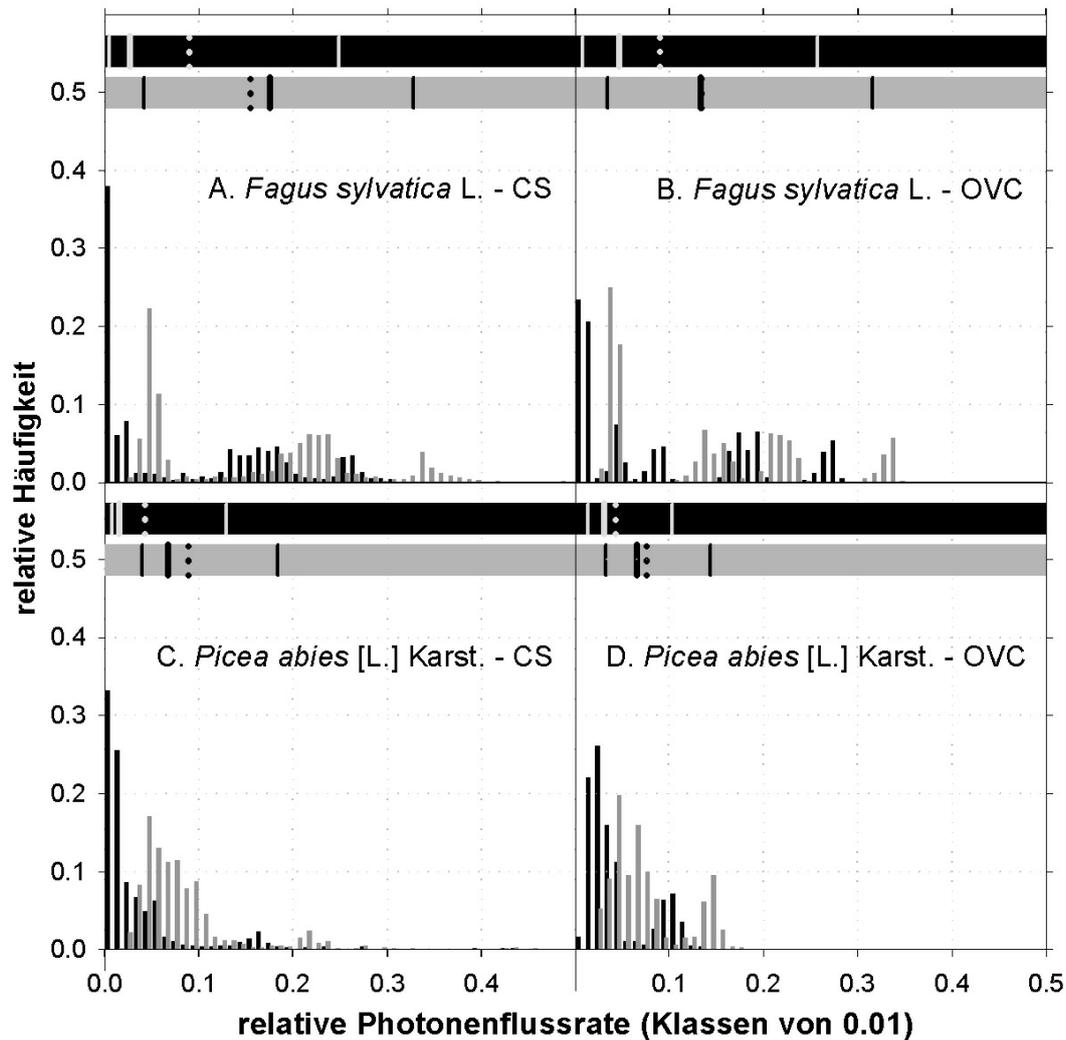


Abbildung 25: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC).

Unterschiede in den Mittelwerten sind jedoch bei der Buche erwartungsgemäß viel deutlicher bei den Fällen mit Belaubung (Abb. 25, 26, 29, 30, 32, 33, 34) ausgeprägt, da die in der belaubungsfreien Zeit absorbierende Biomasse, vornehmlich bestehend aus Zweigen, Ästen und Stämmen, als neutrale und damit nicht wellenlängenselektive Filter wirksam werden [AMMER, 2000]. Bei der immergrünen Fichte sind diese deutlichen Unterschiede zwischen den Spektralbändern ganzjährig zu beobachten. Im Folgenden soll das Hauptaugenmerk auf den PAR-Bereich der PFR (PPFR) gelegt werden. Der NIR-Bereich verhält sich, wenn nicht explizit anderweitig be-

geschrieben, vergleichbar. Die Werte liegen in allen Fällen lediglich auf einem höheren PFR_{rel} -Niveau.

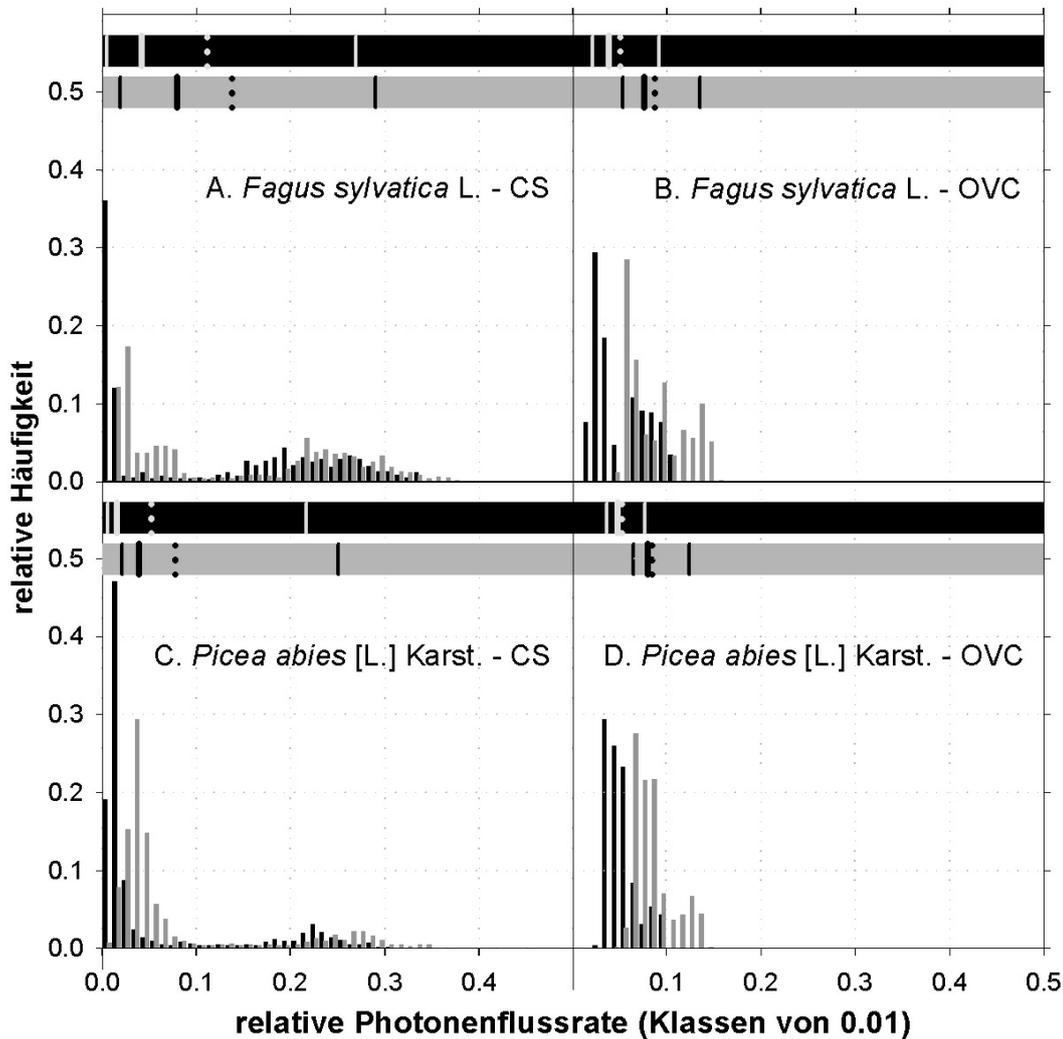


Abbildung 26: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Laubfall der Buche (P3) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 24.10.2004 (CS); 14./16./18./19.10.2004 (OVC).

Die Abb. 24–27 zeigen die Verteilungen der relativen Häufigkeiten der PFR_{rel} am Bestandesboden zu unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstadien, zwei mit (P2, P3) und zwei ohne (P1, P4) Belaubung der Buche. Bei beiden Baumarten tritt bei wolkenlosen Bedingungen eine leicht bimodale Verteilung auf, die bei der Buche ausgeprägter zu beobachten ist. Das Hauptmaximum für den PAR-Bereich liegt in diesen Fällen immer bei sehr niedrigen $PPFR_{rel}$ -Werten ($PPFR_{rel} \leq 0,03$). Der

erste Maximalbereich setzt sich aus einem geringen Teil gestreuter und ungestreuter diffuser Himmelsstrahlung und transmittierter direkter Strahlung, ohne Beitrag von ungestreuter direkter Strahlung, zusammen. Der Einfluss direkter Strahlung ist für den Bereich um das Submaximum, das in allen Fällen zwischen einer $PPFR_{rel}$ von 0,1 und 0,3 liegt, verantwortlich. In diesen Fällen kann man vom Auftreten von Lichtflecken bzw. Halbschatten sprechen. Während dieser Effekte erreicht jedoch die PPFR mit wenigen Ausnahmen in P1 nicht einmal 50 % des vollen Strahlungsgenusses über dem Bestand. Dies zeigt, dass in einem dichten Mischbestand mit einem projizierten Blattflächenindex von durchschnittlich $6,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ und geringen Kronenlücken [REITER, 2004], bei Belaubung (P2, P3) und ohne Belaubung bei geringem Strahlungseinfallswinkel (P4) die volle solare Einstrahlung den Bestandesboden nicht erreicht. Dies würde größere Kronenlücken voraussetzen. Die hohen $PPFR_{rel}$ -Werte unterhalb der Buche in P1, die zum Teil an die Maximalwerte über dem Bestand heranreichen, erklären sich durch die fehlende Belaubung und den damit entstandenen größeren Lücken in Verbindung mit dem bereits hohen Sonnenstand im Frühjahr.

Bei vollständig bewölktem Himmel ist kein eindeutiges Verteilungsmuster erkennbar. Die Strahlungssumme setzt sich in diesen Fällen aus allen Varianten der diffusen Strahlung zusammen. Im Vergleich zu den CS-Bedingungen liegt der Anteil diffuser Strahlung bei 100 %. Da diffuse Strahlung relativ betrachtet einen größeren Beitrag seitlich einfallender Strahlung liefert, liegt die $PPFR_{rel}$ über den Vollschatenwerten bei wolkenlosem Himmel, wie es bereits von MÉTHY [1987] und MORGAN ET AL. [1985] beobachtet wurde. In keinem Fall erreicht der Anteil der PPFR mehr als 40 % der Referenzwerte über dem Bestand.

Die $PPFR_{rel}$ unterhalb der Fichtenkrone ist im Vergleich zu den Werten unterhalb der Buchenkrone in allen Fällen, mit Ausnahme von P3, bei Bewölkung signifikant niedriger ($p < 0,01$). Dies liegt an der niedrigeren Zahl der auftretenden Lichtflecken und an der niedrigeren Transmission durch die Fichtenkrone.

Stellvertretend für die Strahlungsverteilung in der Krone wird die Ebene 4 (20 m Höhe, Schattenkrone) näher betrachtet. Der Betrachtungszeitraum entspricht dem der bereits beschriebenen Bodenebene. Bei vollständig bewölktem Himmel zeigen die Verteilungen bei der Fichte erwartungsgemäß kaum Unterschiede im Jahresverlauf. Ein Hauptmaximum der $PPFR_{rel}$ unter 0,1 wird von mehreren kleineren Submaxima begleitet, deren Wertebereiche bis maximal 0,56 in P3 gehen. Im Gegensatz dazu ist bei OVC-Bedingungen bei der Buche ein deutlicher Unterschied zwischen belaubten und unbelaubten Stadien zu beobachten. Die sehr geringen Werte von $PPFR_{rel}$ in P3 und noch stärker ausgeprägt in P2 mit maximal 5 % des Referenzwertes über dem Bestand zeigen die hohe Extinktion im dichten Kronenbereich der Buche. Die im Vergleich dazu erhöhten Werte am Bestandesboden erklären sich ausschließlich durch die seitlich einfallende diffuse Strahlung. Die höheren Werte bei der Fichte lassen sich durch die konische Wuchsform erklären, die es einem gewissen Anteil der diffusen Strahlung ermöglicht in den Kronenraum einzudringen, jedoch meist nicht

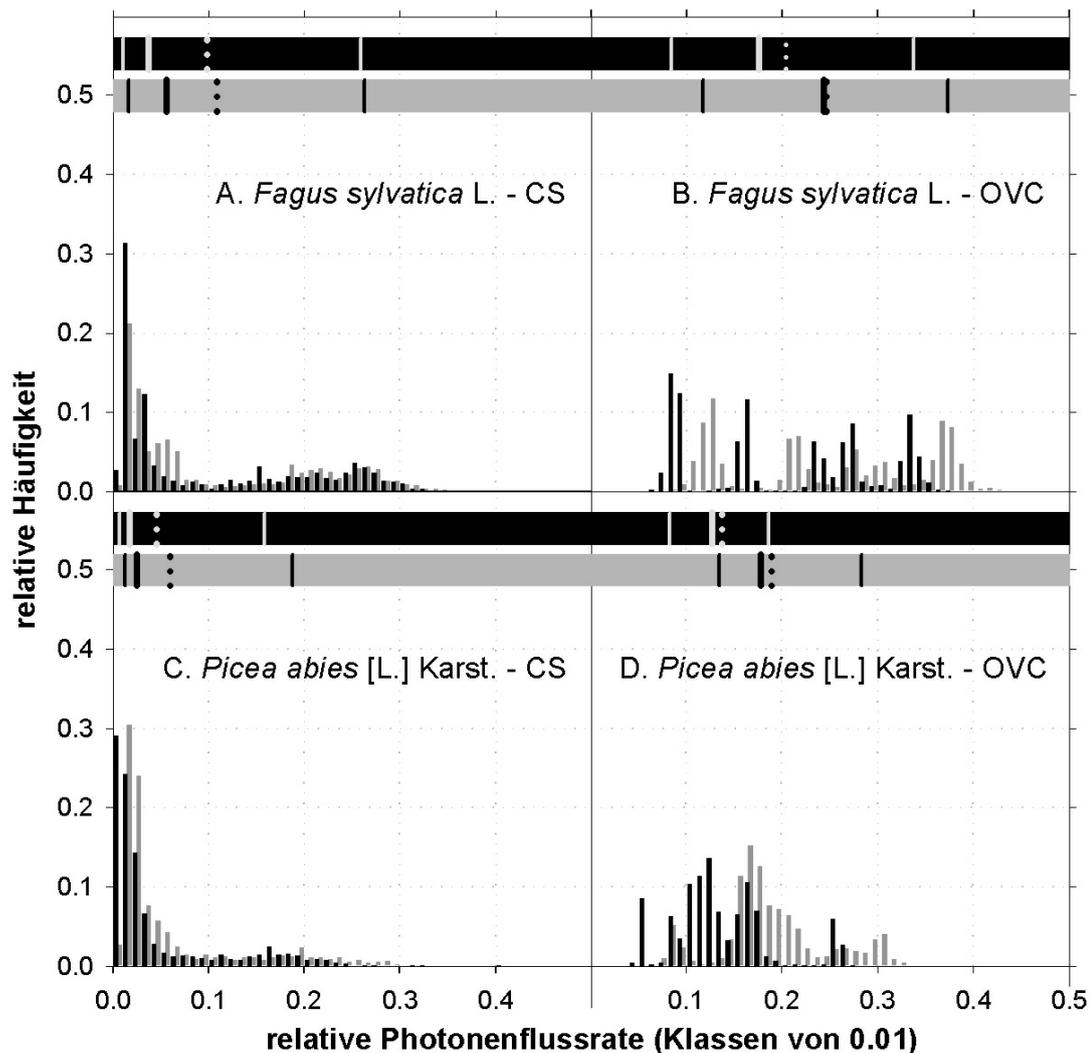


Abbildung 27: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden nach Laubfall der Buche (P4) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 15./21.11.2004 (CS); 12./16.11.2004 (OVC).

zum Bestandesboden durchzudringen, was die niedrigeren Bodenwerte unterhalb der Fichtenkrone erklärt.

Bei wolkenlosem Himmel ist bei der Fichte in erster Linie der Einfluss der Sonnenhöhe für die Strahlungsverteilung in der Schattenkrone von entscheidender Bedeutung. Stärker als bei OVC-Bedingungen spielt bei erhöhter direkter Bestrahlung die Wuchsform die entscheidende Rolle. Bei höherem Sonnenstand (P1, P2) kann ein deutlicher Anteil der direkten Strahlung in die unteren Kronenbereiche vordringen. Dies erklärt den großen Anteil der relativen Häufigkeiten mit $PPFR_{rel}$ -Werten

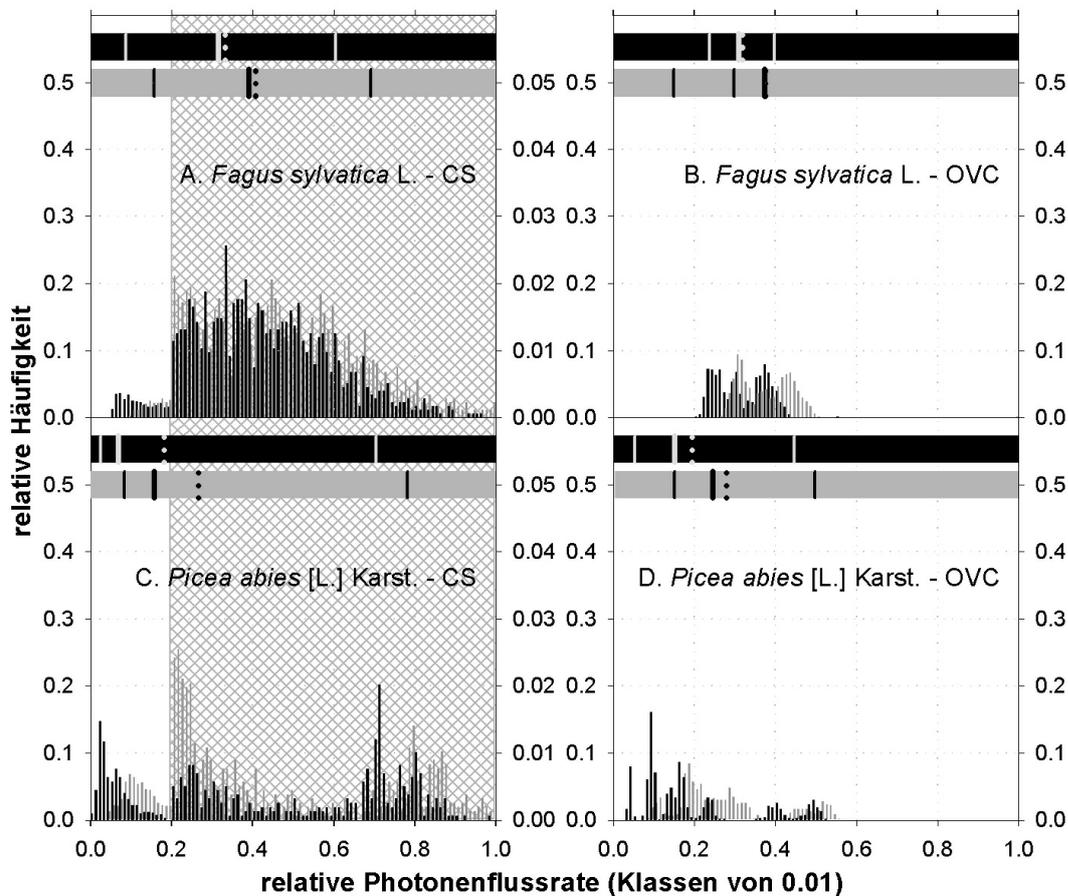


Abbildung 28: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Austrieb der Buche (P3) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 22.04.2005 (CS); 18.04.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

zwischen 0,6 und 0,8. In wenigen Fällen werden sogar die vollen Werte über dem Bestand erreicht.

Bei der Buche hingegen läßt sich eine Koppelung zwischen Belaubungszustand und Sonnenhöhe feststellen. Ähnlich den bewölkten Bedingungen sind auch hier in P2 die niedrigsten Werte der $PPFR_{rel}$ zu sehen. In über 90 % der Fälle nimmt die $PPFR$ Werte von weniger als 2 % der Referenzwerte über dem Bestand ein. In P1 treten in sehr geringem Maße Lichtfleckeneffekte auf. In P4 verhindert der niedrige Sonnenstand ein tieferes Eindringen der direkten Strahlung, da aufgrund des verlängerten Weges durch die Krone die übrigen Biomasseelemente wie Äste und Stämme den Großteil der Strahlung extingieren. Der größte Anteil der Strahlung kann in den Kronenraum eindringen, wenn der laublose Zustand mit einem hohen Sonnenstand kombiniert wird (P1).

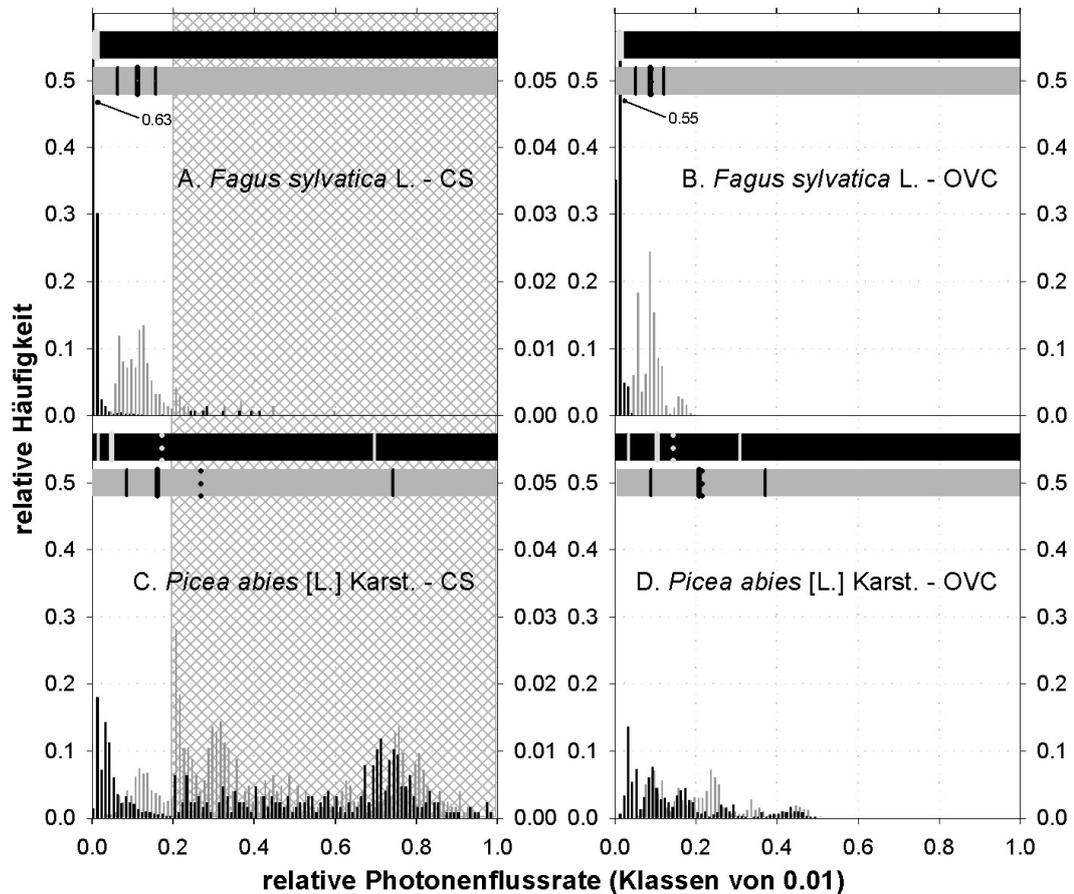


Abbildung 29: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

Die einzelnen Fälle wurden untereinander mit einem t-Test auf signifikante Unterschiede untersucht. Obwohl ein solcher Test eine Normalverteilung voraussetzt und diese nur bei einigen hier untersuchten Fällen angenommen werden kann, wird er trotzdem aufgrund der größeren Trennschärfe im Vergleich zu verteilungsfreien Tests in einem ersten Schritt herangezogen. Der Test dient zu einer ersten Vororientierung und Prüfung der Daten sowie einer ersten Abschätzung der Signifikanzen. In einem nächsten Schritt müssen optimierte statistische Verfahren inklusive verteilungsfreier Tests durchgeführt werden. Diese erweiterte Datenanalyse wird nach Abschluss der noch andauernden Messungen in Kooperation mit dem Institut für Biomathematik und Biometrie des GSF – Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit GmbH vollzogen.

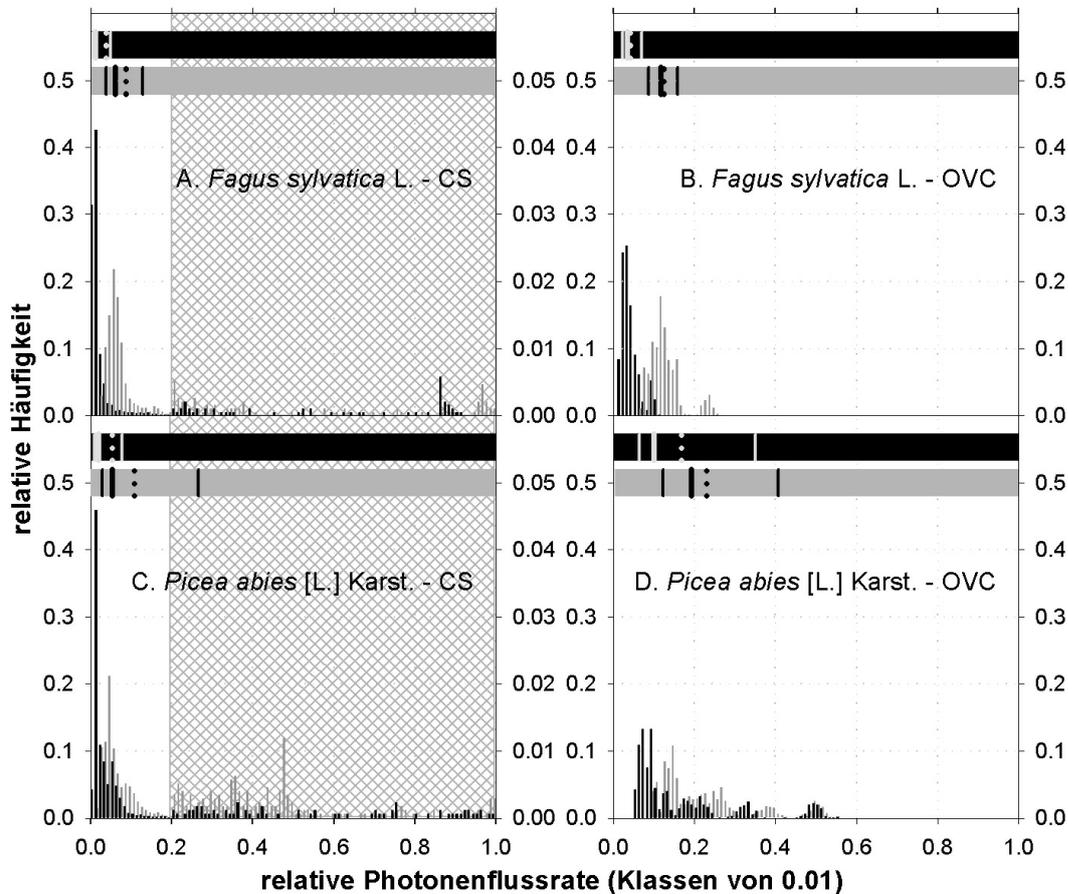


Abbildung 30: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Laubfall der Buche (P3) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 24.10.2004 (CS); 14./16./18./19.10.2004 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

Im Rahmen der Tests wurden für die Bodenebene und die Ebene 4 innerhalb jeder phänologischen Phase sämtliche Möglichkeiten sowohl für den PAR- als auch für den NIR-Bereich miteinander verglichen. In fast allen Fällen waren die Datenreihen signifikant voneinander verschieden. Deshalb sollen im Folgenden nur die Fälle genannt werden, die nicht mindestens das 90 %-Signifikanzniveau erreichten. Bei P2 zeigte der Vergleich bei Buche und Fichte am Boden zwischen wolkenlosen und bewölkten Bedingungen im PAR-Bereich keine signifikanten Unterschiede, bei Buche in Ebene 4 wurde das 90 %-Niveau knapp verfehlt. Somit scheinen die seltenen Lichtfleckeneffekte bei CS- und die seitlich einfallende Strahlung bei OVC-Bedingungen in etwa den gleichen Einfluss auf die relativen Photonflussraten zu haben. Für den PAR-Bereich vor Laubfall sind bei der Fichte auf Bodenniveau keine

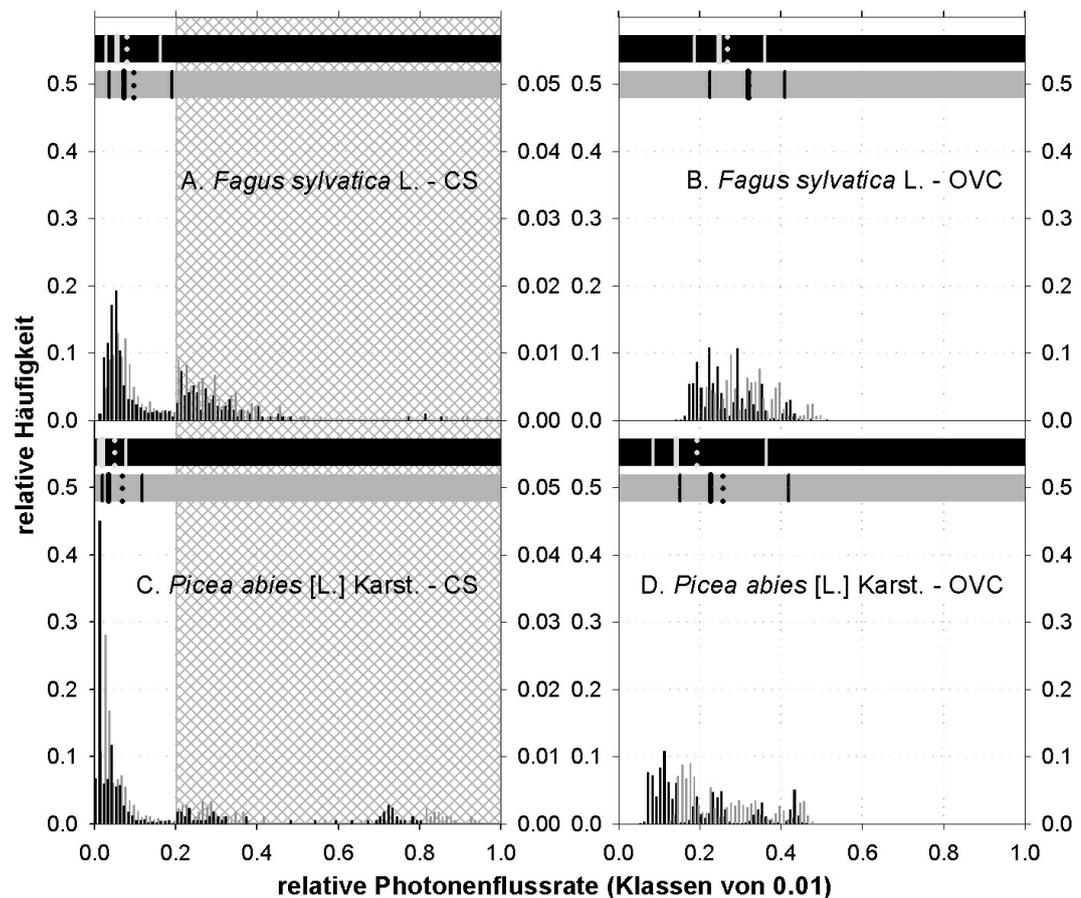


Abbildung 31: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden nach Laubfall der Buche (P4) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 15./21.11.2004 (CS); 12./16.11.2004 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

Unterschiede im Vergleich der meteorologischen Bedingungen festzustellen, bei der Buche in Ebene 4 wird das Signifikanzniveau knapp verfehlt. Im NIR-Bereich ist der einzige Fall, bei dem die 90 %-Schwelle nicht ganz erreicht wird, beim Vergleich der Bewölkungsbedingungen in Ebene 4 in P1 bei Fichte. Die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Spektralbereichen wurden bereits weiter oben geschildert.

Zusätzlich zu den beiden bereits betrachteten Ebenen wurden für die Ebenen 2 (14 m), 3 (17 m) und 5 (23 m) relative Häufigkeitsverteilungen für den Fall P2 erstellt (Abb. 32–34). In Bezug auf die Lichtfleckenhäufigkeiten ist bei der Buche unter CS-Bedingungen eine deutliche Abnahme von der Sonnenkrone (Ebene 5, Abb. 34) bis in die 3 m darunterliegende Ebene 4 (Abb. 29) zu erkennen. Die Abnahme der Lichtflecken bei der Fichte erfolgt langsamer als bei der Buche, was wie erwähnt mit der unterschiedlichen Wuchsform der beiden Baumarten zusammenhängt.

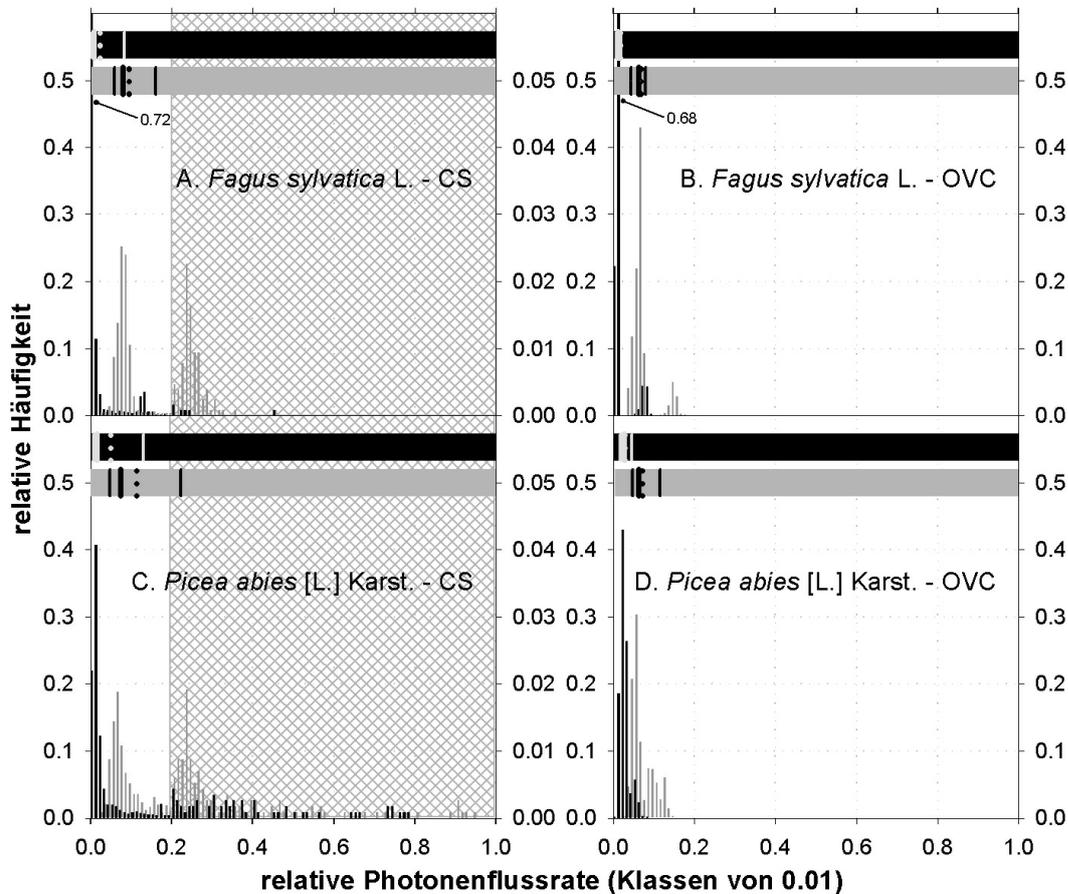


Abbildung 32: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 14 m Höhe (Ebene 2) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

Ein Vergleich der in dieser Studie erhobenen Werte mit Werten aus der Literatur ist aufgrund der unterschiedlichen Messmethode (sphärisch gegenüber planar) und der meist unterschiedlichen Baumarten nur bedingt möglich, aber dennoch wichtig. BALDOCCHI ET AL. [1986] führte für den integrierten PAR-Bereich eine ähnliche Studie der Häufigkeitsverteilung von Strahlungslevels in drei Kronenebenen eines Eichen-Hickory-Mischwalds über unterschiedliche phänologische Phasen durch. Als PAR-Durchdringungsklassen wurden Stufen von 0,1 gewählt im Vergleich zu 0,01 in dieser Untersuchung. Es werden nur Buchenwerte zum Vergleich herangezogen.

Bei voller Belaubung stimmen die Verteilungen in den entsprechenden Kronenregionen ziemlich gut überein, da sowohl im Eichen-Hickory-Bestand als auch bei der Buche je nach Kronenebene ca. 60 bzw. 80% der Strahlung in den Klassen unter 10% der $PPFR_{rel}$ liegen. Eine bimodale Verteilung unterhalb des Kronenschlusses

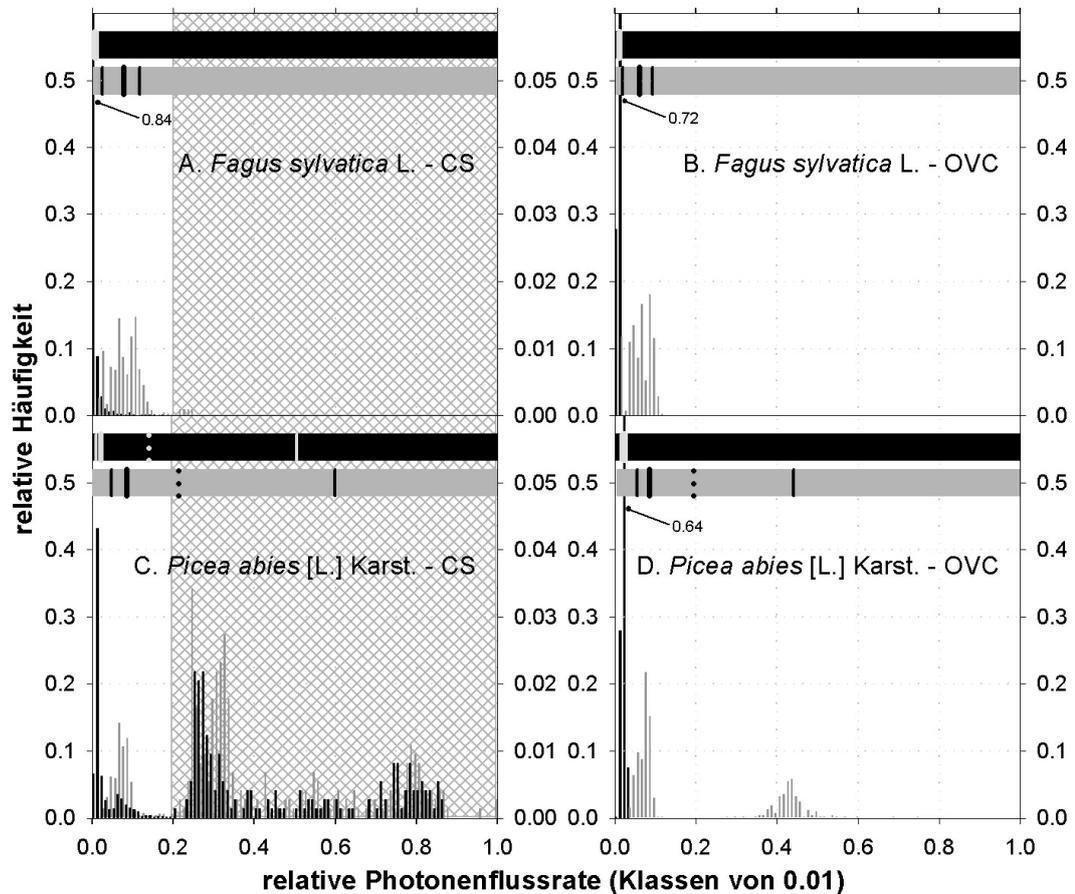


Abbildung 33: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 17 m Höhe (Ebene 3) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

sowie eine unimodale Verteilung im Stammraum tritt in beiden Studien in etwa gleichem Maße auf. Ohne Belaubung liegen bei BALDOCCHI ET AL. [1986] die Werte der Maximalbereiche der unimodalen Verteilung in allen Ebenen deutlich über den Werten der Buchenkrone, was durchaus auf den unterschiedlichen Sonnenstand, aber auch an der Reduktion der eintreffenden Strahlung in die Buchenkrone aufgrund der sie umgebenden benadelten Fichten zurückzuführen ist.

Um vertikale Charakteristika und Variabilitäten von durchschnittlichen Strahlungsquantitäten zu illustrieren, sind in Abb. 35 die Mittelwerte bzw. Variationskoeffizienten der auftretenden PFR_{rel} für die beiden Spektralbereiche für P2 in den verschiedenen Ebenen dargestellt. Die Mittelwerte wurden wie in den Histogrammdarstellungen aus denselben Daten zwischen 09:00 h und 15:00 h MEZ ermittelt. Sie liefern im Gegensatz zu den Momentaufnahmen in Abb. 21–22 wichtige Informa-

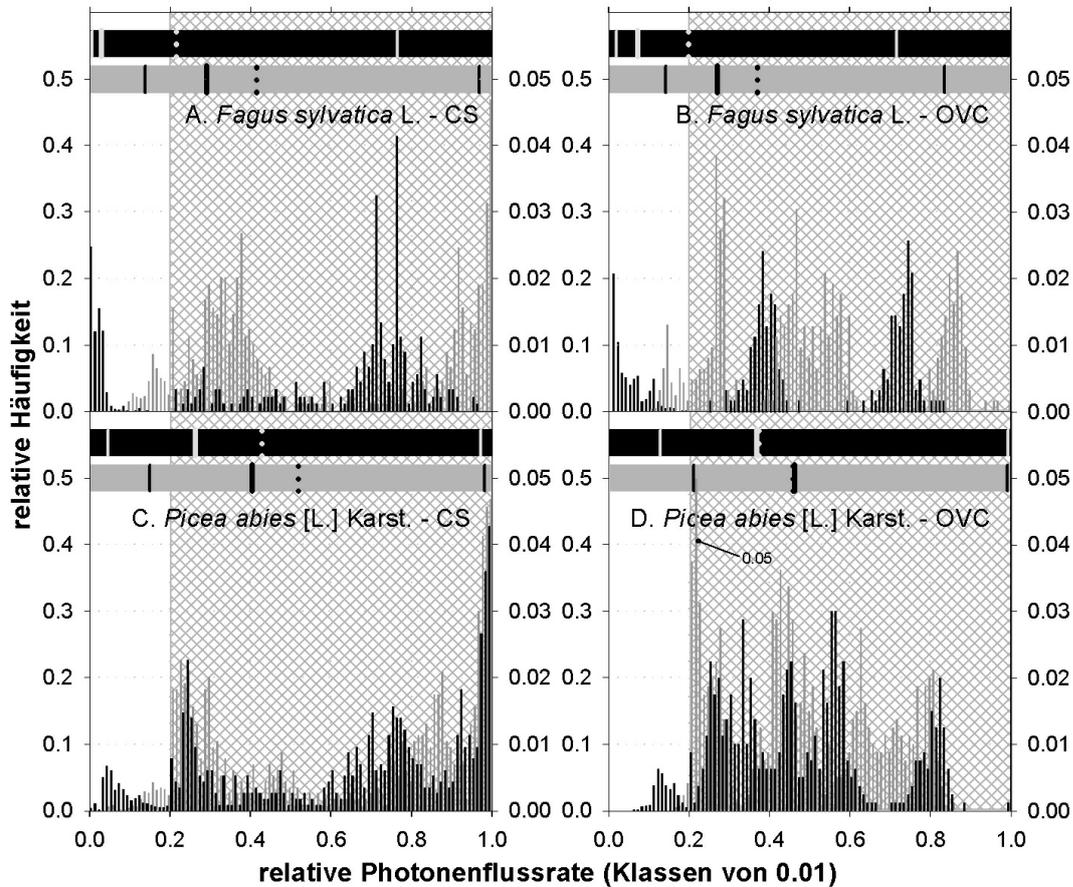


Abbildung 34: siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 23 m Höhe (Ebene 5) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.

tionen über die durchschnittliche Strahlungsverteilung in vergleichbaren Beständen sowie über die Variabilität der einzelnen Ebenen. Die Verteilungsmuster sind jedoch nicht normalverteilt, sondern folgen je nach Rahmenbedingungen unterschiedlichen Verteilungsmustern, die in den Häufigkeitsverteilungen dargestellt sind.

Bei Betrachtung der Abb. 35 A fällt auf, dass bei der Buche die Bewölkungsbedingungen für den Mittelwert keine Rolle spielen, was durch den t-Test bereits aufgezeigt wurde. In beiden Fällen reduziert sich die auftreffende Photonemenge im PAR-Bereich bereits kurz unter der Kronenoberseite in Ebene 5 auf ca. ein Fünftel und drei Meter tiefer in Ebene 4 auf lediglich etwas über 1% der Referenz über dem Bestand. Auf der eine Stufe tiefer gelegenen Ebene sind kaum Veränderungen zu verzeichnen, während direkt unterhalb der Krone auf Ebene 2 wieder ein leichter Anstieg auf etwa 2% des Referenzwertes zu erkennen ist, der bereits auf den

Einfluss seitlich einfallender diffuser Strahlung zurückzuführen ist. Diese Komponente ist zusammen mit der größeren Häufigkeit des Auftretens direkter Strahlung in Lichtflecken auch verantwortlich für den Anstieg auf Werte um die 9% der Freiland-PPFR am Bestandesboden.

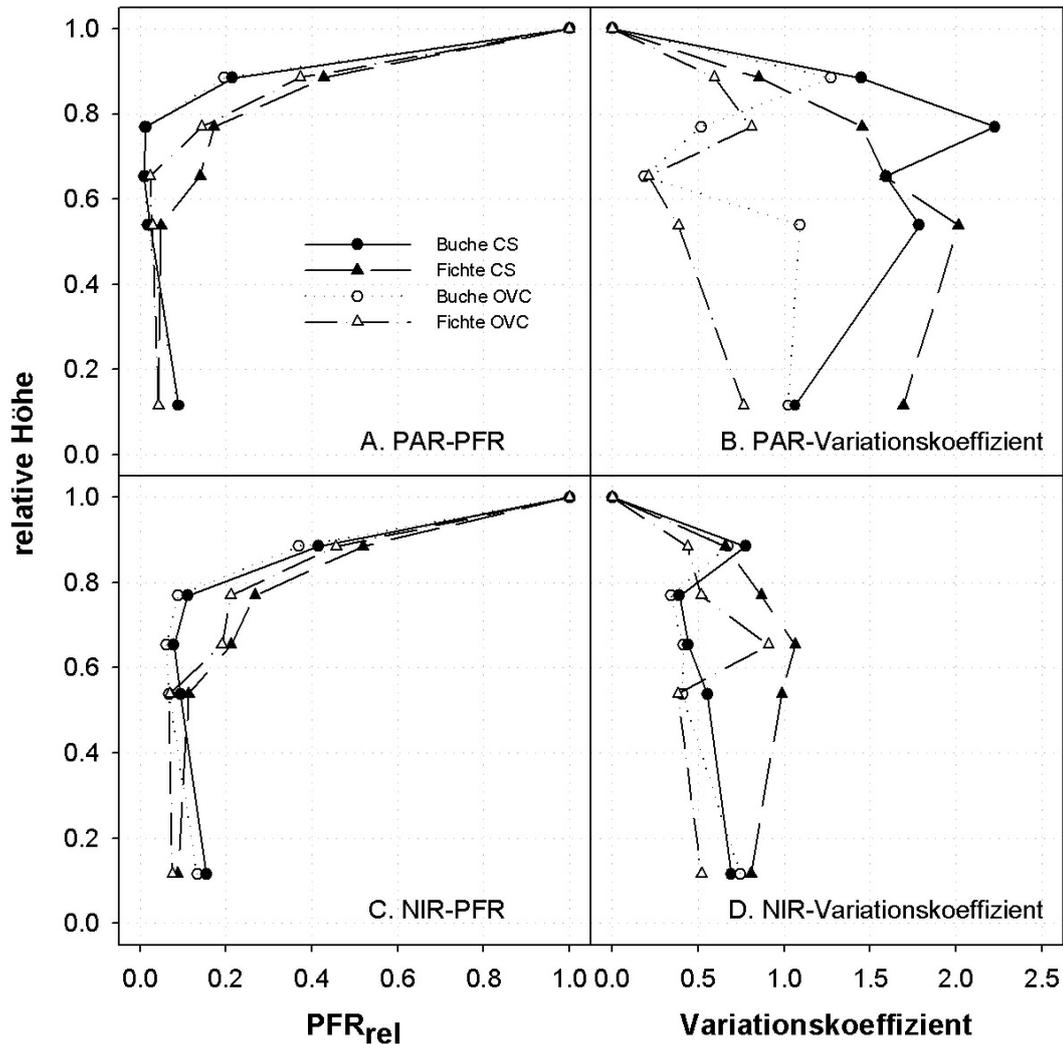


Abbildung 35: Vertikalprofile der Mittelwerte der Photonenflussraten (A, C) und der Variationskoeffizienten (B, D) bei voller Belaubung (P2) für Buche und Fichte bei bewölkten (OVC; 11.07.2005 12:00 MEZ) und wolkenlosen (CS; 15.07.2005 12:00 MEZ) Bedingungen für den PAR- (A, B) und den NIR-Bereich (C, D)

Das Vertikalprofil in der Fichtenkrone zeichnet sich durch einen etwas langsameren Abfall der vorhandenen PPFR aus. Der Einfluss des Bewölkungsgrades spielt eine etwas größere Rolle. Die Werte bei wolkenlosem Himmel liegen in der Krone immer knapp, in Ebene 3 sogar stark, über den bei OVC-Bedingungen. So erhält die Ebene

5 noch 43 % (CS) bzw. 37 % und die Ebene 4 noch 17 % bzw. 14 % der Referenzstrahlung. Die Ebene 3 verzeichnet die größten Unterschiede, die wie bereits erwähnt mit der Wuchsform zu erklären sind, und erhält 14 % bzw. 3 % der Referenz-PPFR. Zum Bestandesboden gelangen in beiden Fällen etwa 4 %, was weniger als die Hälfte der $PPFR_{rel}$ unter der Buchenkrone ausmacht. Eine sigmoidale Abnahme der Fichtenprofile, wie von ROUJEAN [1999] für Schwarzfichten beschrieben, kann nicht beobachtet werden. Vielmehr scheint innerhalb der Krone die Abnahme der Strahlungsmenge beider Baumarten mit zunehmender Kronentiefe nach dem Gesetz von BEER-BOUGER-LAMBERT (vgl. Kap. 2.2.2) zu verlaufen.

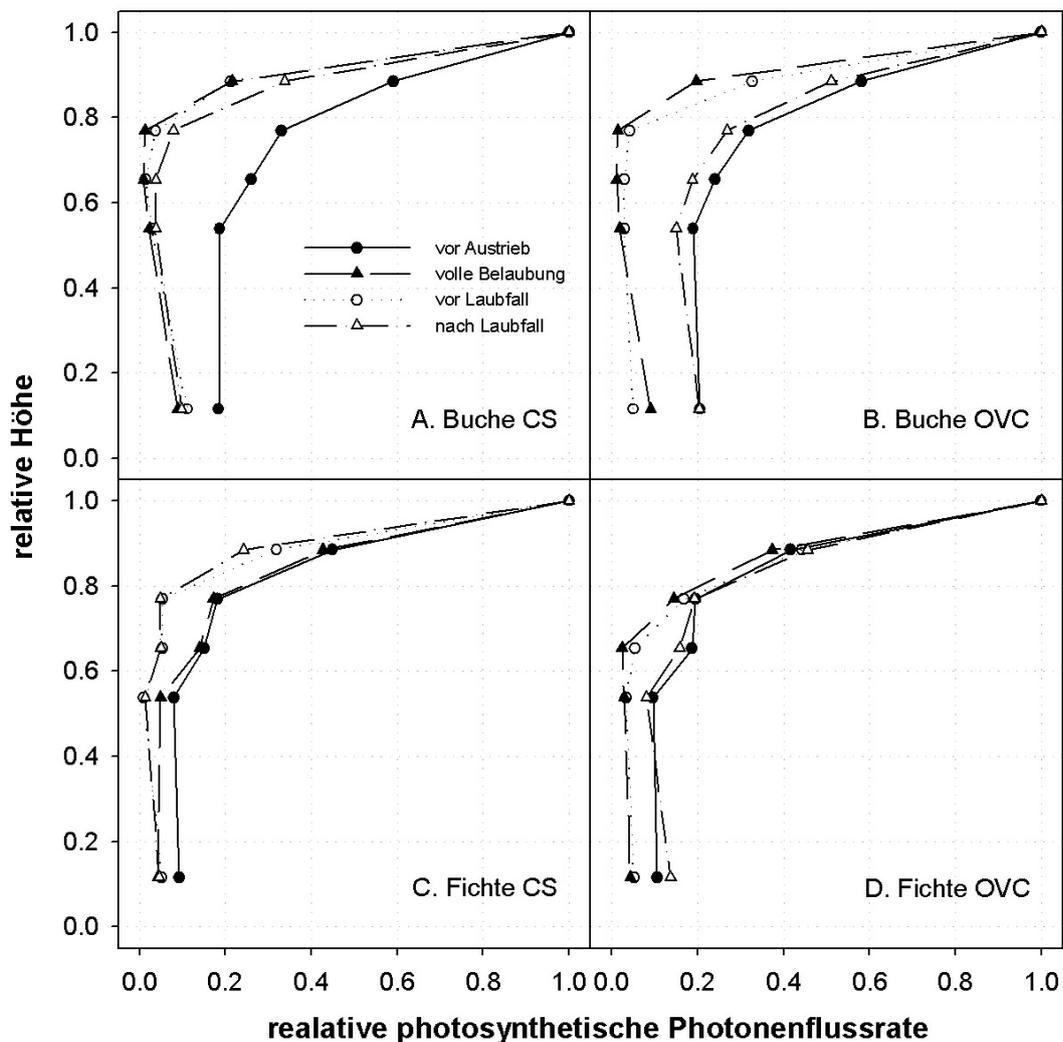


Abbildung 36: Vertikalprofile der Mittelwerte der photosynthetischen Photonenflussraten zu verschiedenen phänologischen Phasen (P1–P4) für Buche (A, B) und Fichte (C, D) zu bewölkten (OVC; B, D) und wolkenlosen (CS; A, C) Bedingungen

Im NIR-Bereich verhalten sich die Vertikalprofile entsprechend des Verlaufs des PAR-Bereichs, jedoch auf höherem Niveau (Abb. 35 C). Die großen Unterschiede bei Fichte in Ebene 3 sind in diesem Spektralbereich nicht vorhanden. Die größte Extinktion läßt sich in den Buchenprofilen auf Ebene 3 (CS: 8%; OVC: 6%) und in den Fichtenprofilen am Bestandesboden (CS: 9%) bzw. in Ebene 2 (OVC: 7%) feststellen.

Die Variabilitäten innerhalb der Ebenen, ausgedrückt durch die Variationskoeffizienten, zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Spektralbereichen. In fast allen Ebenen liegen die Koeffizienten im PAR-Bereich höher als im NIR. Bei Betrachtung der meteorologischen Rahmenbedingungen kommt in der stets höheren Variabilität bei CS-Bedingungen das Vorhandensein von Lichtflecken zum Ausdruck.

Die Werte der $PPFR_{rel}$ in der Krone und am Bestandesboden stimmen mit den meisten der zahlreich durchgeführten Studien zur PAR-Transmission in dichten Beständen überein. Am Bestandesboden liegen die Werte dieser Studie allerdings häufig über den vergleichbaren Werten, da die seitlich einfallende Strahlung in dem untersuchten Bestand des Kranzberger Forstes einen signifikanten Beitrag liefert und deshalb die Strahlungswerte erhöht. Vergleichbare Untersuchungen wurden unter anderem von DE CASTRO [2000], ROUJEAN [1999], TURNBULL UND YATES [1993] und BALDOCCHI ET AL. [1986, 1984a, 1984b] durchgeführt.

In Abb. 36 sind Vertikalprofile der Mittelwerte der photosynthetischen Photonflussraten zu verschiedenen phänologischen Phasen (P1–P4) für beide Baumarten unter OVC- und CS-Bedingungen dargestellt. Die Profile sind unter Berücksichtigung der Kombination aus Belaubungszustand der Buche und Sonnenhöhe erklärbar. Der indirekte Effekt des Buchenlaubfalles macht sich bei den Fichten erwartungsgemäß nicht so stark bemerkbar wie bei den Buchenprofilen. Bei CS-Bedingungen ist der Sonnenstand entscheidend. Höherer Sonnenstand bedeutet, dass mehr Strahlung in tiefere Kronenregionen der Fichten eindringen kann. Bei OVC-Bedingungen sind die etwas höheren Strahlungswerte in der Fichtenkrone in den unbelaubten Phasen zu finden. Die unbelaubten Situationen vor Austrieb und nach Laubfall erlauben es bei OVC-Bedingungen der diffusen Strahlung tiefer in die Buchenkrone einzudringen. Bei unbewölktem Himmel ermöglicht wiederum die Kombination aus hohem Sonnenstand und fehlender Belaubung kurz vor dem Austrieb der Buche die höchsten Strahlungswerte.

Im Vergleich zu einem Eichen-Hickory-Mischbestand [BALDOCCHI ET AL., 1984b] liegen die Werte in allen Ebenen und zu allen phänologischen Phasen niedriger, was sich durch die unterschiedlichen Blattflächenindizes erklären lässt [WIRTH ET AL., 2001]. Der Verlauf der Profile richtet sich jedoch in beiden Fällen nach dem Gesetz von BEER-BOUGER-LAMBERT, wenn auch mit unterschiedlichen Koeffizienten.

In Tab. 6 sind wichtige Untersuchungen aufgelistet, die sich unter anderem mit dem R/FR beschäftigt haben. Die Auflistung wurde von AMMER [2000] übernommen

Bestandesform	Bewölkung	R/FR	Autoren
Buche (keine Altersangabe) (Großbritannien)	alle	0,16-0,64	Tasker & Smith [1977]
Eiche (keine Altersangabe) (Großbritannien)	alle	0,37-0,77	Tasker & Smith [1977]
Birke (keine Altersangabe) (Großbritannien)	alle	0,56-0,78	Tasker & Smith [1977]
Hasel (keine Alters- und keine Ortsangabe)	OVC	0,45-1,1	Woodward [1983]
über 100-jähriger Eichen- bestand (Großbritannien)	OVC	0,55-0,9	Hughes et al. [1985]
11-jähriger <i>Pinus radiata</i> - Bestand (Neuseeland)	CS OVC	0,22-0,41 0,68-0,96	Morgan et al. [1985]
Buche (keine Alters- und keine Ortsangabe)	OVC	0,38*	Méthy et al. [1987]
verschiedene 40-140 Jahre alte Na- delholz-Mischbestände (Kanada)	alle	0,53-0,97*	Ross et al. [1986]
80-185-jähriger Ahorn-Buchen- Birken-Mischbestand (Kanada)	CS OVC	0,14* 0,32*	Messier & Bellefleur [1988]
36-jähriger Nadelholz- Mischbestand (Kanada)	CS OVC	0,30-0,89 0,60-0,96	Messier et al. [1989]
verschiedene Laubholzbestände (keine Altersangabe)(Kanada)	CS	0,1-0,33*	St.-Jacques & Bellefleur [1993]
subtropischer Regenwald (Australien)	alle	0,2-1,0	Turnbull & Yates [1993]
dreijähriger Douglasienjungwuchs (USA)	k.A.	0,79-1,04	Ritchie [1997]
75-78-jährige Fichtenbestände (Deutschland)	alle	0,02-1,15	Ammer [2000]
tropischer Feuchtwald (Puerto Rico)	CS	0,36-1,35	de Castro [2000]
tropischer Feuchtwald (Costa Rica)	alle	0,11-0,98	Capers & Chazdon [2000]
kühl-gemäßigter Laub- mischwald (Japan)	alle	0,23-1,2	Muraoka et al. [2001]

* Mittelwerte

Tabelle 6: Unter Waldbeständen ermittelte R/FR verschiedener Autoren (ergänzt nach Ammer [2000])

Variante	Bewölkung	R/FR
Buche nach Austrieb	CS	0,08 - 0,96
Buche nach Austrieb	OVC	0,09 - 1,10
Fichte nach Austrieb	CS	0,14 - 1,05
Fichte nach Austrieb	OVC	0,27 - 1,03
Buche volle Belaubung	CS	0,06 - 1,11
Buche volle Belaubung	OVC	0,09 - 1,05
Fichte volle Belaubung	CS	0,13 - 1,15
Fichte volle Belaubung	OVC	0,21 - 1,10
Buche vor Laubfall	CS	0,17 - 1,17
Buche vor Laubfall	OVC	0,19 - 1,06
Fichte vor Laubfall	CS	0,19 - 1,17
Fichte vor Laubfall	OVC	0,41 - 1,10
Buche nach Laubfall	CS	0,41 - 1,19
Buche nach Laubfall	OVC	0,69 - 1,14
Fichte nach Laubfall	CS	0,25 - 1,20
Fichte nach Laubfall	OVC	0,52 - 1,12

Tabelle 7: Spannen der im Kranzberger Forst ermittelten R/FR unter verschiedenen Bewölkungsbedingungen (OVC: bewölkt, CS: klar) während vier phänologischer Phasen

und mit neueren Ergebnissen ergänzt. Die darin enthaltenen Angaben des R/FR sind entweder die gemessenen Spannen oder Mittelwerte. Die Werte variieren je nach Alter und Zusammensetzung des Pflanzenbestandes sowie nach Bewölkungsbedingungen erheblich. Die maximal gemessenen Werte liegen bei 1,35 in einem tropischen Feuchtwald Costa Ricas [DE CASTRO, 2000], die niedrigsten in Fichtenaltbeständen in Süddeutschland [AMMER, 2000]. Im Vergleich dazu sind die R/FR-Spannen der unterschiedlichen Varianten aus dieser Arbeit in Tab. 7 aufgelistet. Der Vergleich zeigt, dass die im Kranzberger Forst gemessenen Werte für Fichte und Buche innerhalb der von der Literatur vorgegebenen Spanne liegen. Der Maximalwert von 1,20 wurde bei Fichte nach dem Laubfall der Buche, der niedrigste Wert von 0,06 bei Buche während der vollen Belaubung jeweils unter CS-Bedingungen gemessen. Während der drei belaubten Stadien liegen jeweils die unteren Grenzen des R/FR-Wertebereichs der Buche unter denen der Fichte, im unbelaubten Zustand kehrt sich die Situation um. Nach dem Laubfall steigen die unteren Grenzen bei allen vier Varianten im Vergleich zu den belaubten an.

Zwar haben die Bewölkungsbedingungen keine große Auswirkung auf die R/FR-Werte oberhalb der Vegetation und liegen im Durchschnitt bei Werten um die 1,15 [AMMER, 2000, MESSIER UND BELLEFLEUR, 1988, MORGAN ET AL., 1985],

jedoch ist unterhalb des Kronendachs ein deutlicher Unterschied zwischen klaren und bewölkten Tagen zu sehen. So dringt laut MÉTHY [1987] und MORGAN ET AL. [1985] an bedeckten Tagen vermehrt diffuse Strahlung ohne Wechselwirkung mit der Vegetation durch Kronenlücken in den Bestand ein als an Strahlungstagen. Dieser Befund ist auch für das R/FR im Kranzberger Forst gültig (siehe Tab. 7).

3.3.3 Beziehung zwischen photosynthetisch und photomorphogenetisch aktiver Strahlung

Es gibt in der Literatur einige Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen den photosynthetisch und photomorphogenetisch aktiven Komponenten der Strahlung in einem Baumbestand [CAPERS UND CHAZDON, 2004, MURAOKA ET AL., 2001, OLESEN, 1992, LEE, 1987]. Allerdings basieren die dort gezeigten Beobachtungen auf einer relativ geringen Anzahl an Messwerten, die innerhalb kurzer Zeiträume erhoben wurden. CAPERS UND CHAZDON [2004] sehen in der Bestimmung des R/FR eine einfache Möglichkeit zur Erfassung von verschiedenen Lichtniveaus ausgedrückt in Prozent diffuser Transmission. Sie erhalten aus ihren 178 Messwerten in einem Tropenwald eine logarithmische Beziehung mit einem R^2 von 0,97. Eine ebenfalls hohe Korrelation ($R^2 = 0,97$ bzw. 0,95) zwischen R/FR und dem Logarithmus des prozentualen Anteils am PPFD der vollen Sonne wird bei LEE [1989, 1987] in zwei neotropischen Regenwäldern ermittelt. MURAOKA ET AL. [2001] untersuchten den Zusammenhang in fünf unterschiedlichen Vegetationstypen, quantifizierten die Abhängigkeiten allerdings nicht. Aus den Ergebnissen geht jedoch hervor, dass für alle Typen ein logarithmischer Zusammenhang besteht, der je nach Vegetationstypus unterschiedliche Steilheit einnimmt.

In dieser Arbeit wurde ein vergleichbarer Ansatz herangezogen, der es ermöglichen soll, anhand von Messwerten im PAR-Bereich auf die photomorphogenetisch aktive Strahlung zu schließen. In den Abb. 37-40 sind die $PPFR_{rel}$ und das R/FR gegeneinander aufgetragen. Es wird dabei wiederum zwischen den Baumarten und den Bewölkungsbedingungen unterschieden. Die Ergebnisse aus vier phänologischen Phasen stehen stellvertretend für den Verlauf einer Vegetationsperiode. Die vier betrachteten Stadien sind: direkt nach dem Laubaustrieb der Buche (S1), volle Belaubung (S2), kurz vor Laubfall (S3) und kurz nach Laubfall der Buche (S4). In allen Fällen lieferte eine rechtwinklige hyperbolische Sättigungsfunktion die beste Korrelation, ausgedrückt durch die Gleichung:

$$\zeta = a + b(1 - e^{-c\phi_{p,r}}) \quad (20)$$

mit ζ : R/FR und $\phi_{p,r}$: relative photosynthetische Photonenflussrate.

Die Anwendung einer solchen Funktion ist plausibel, da die Variable R/FR im Freiland auch einen maximalen Grenzwert nicht überschreitet. Dieser Grenzwert ist allerdings nicht konstant, sondern variiert in erster Linie mit den meteorologisch-klimatischen Rahmenbedingungen. Aus diesem Grund muss eine Unterscheidung

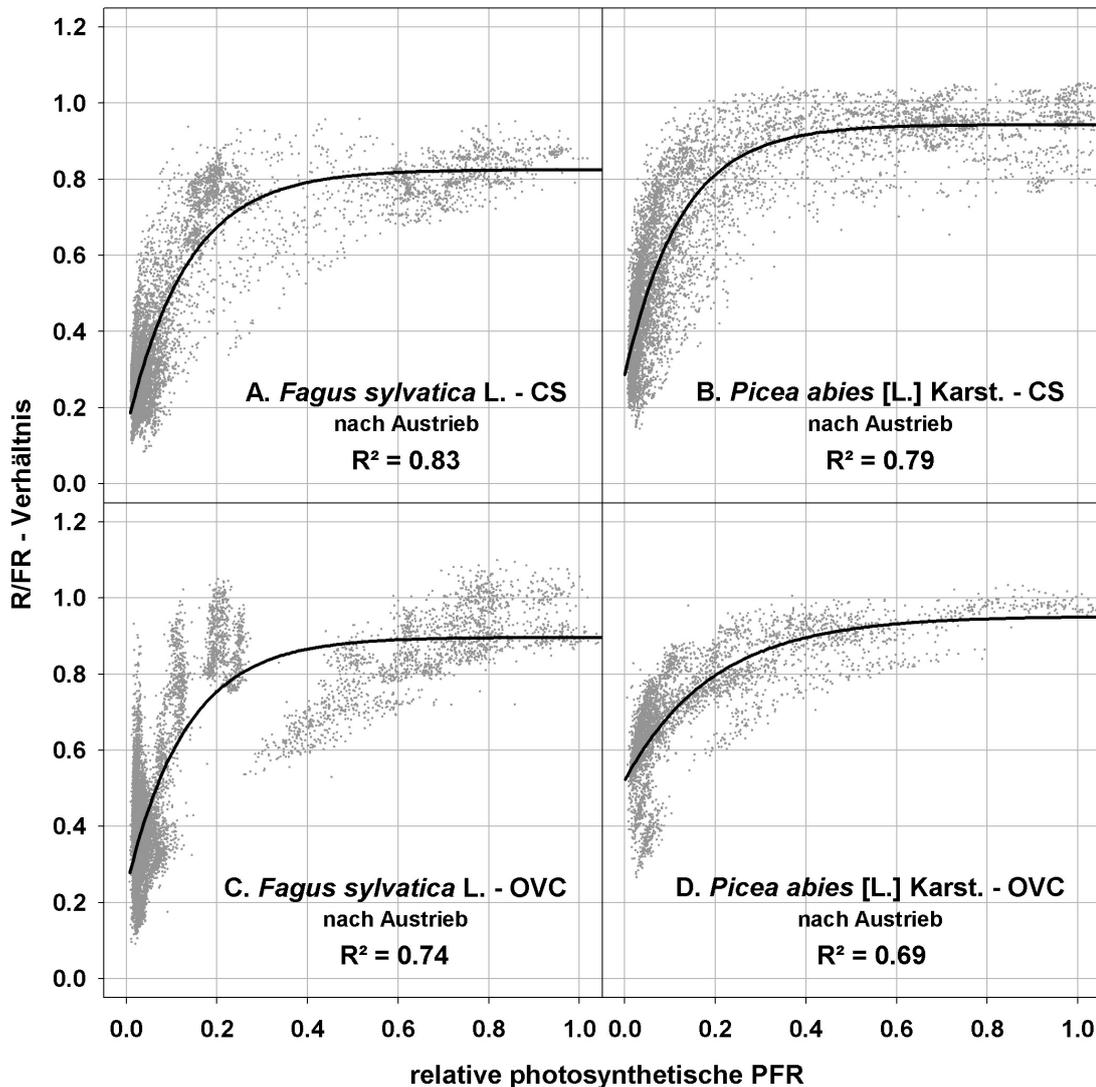


Abbildung 37: Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen kurz nach dem Laubaustrieb der Buche (Zeitraum: 11.05.–18.05.2005)

nach Bewölkungsgrad erfolgen. Um den Einflussfaktor Sonnenhöhe, vor allem bei niedrigen Sonnenständen zu eliminieren, wurden nur Messwerte zwischen 09:00 und 15:00 h MEZ herangezogen. Im Folgenden sollen nun Unterschiede im Jahresverlauf, sowie zwischen den Baumarten und den Bewölkungsbedingungen beschrieben und die Abhängigkeiten quantifiziert werden. In Tab. 8 sind die Parameterwerte (a, b, c), die Bestimmtheitsmaße (R^2) und die Anzahl der herangezogenen Messwerte (N) für alle betrachteten Fälle aufgelistet.

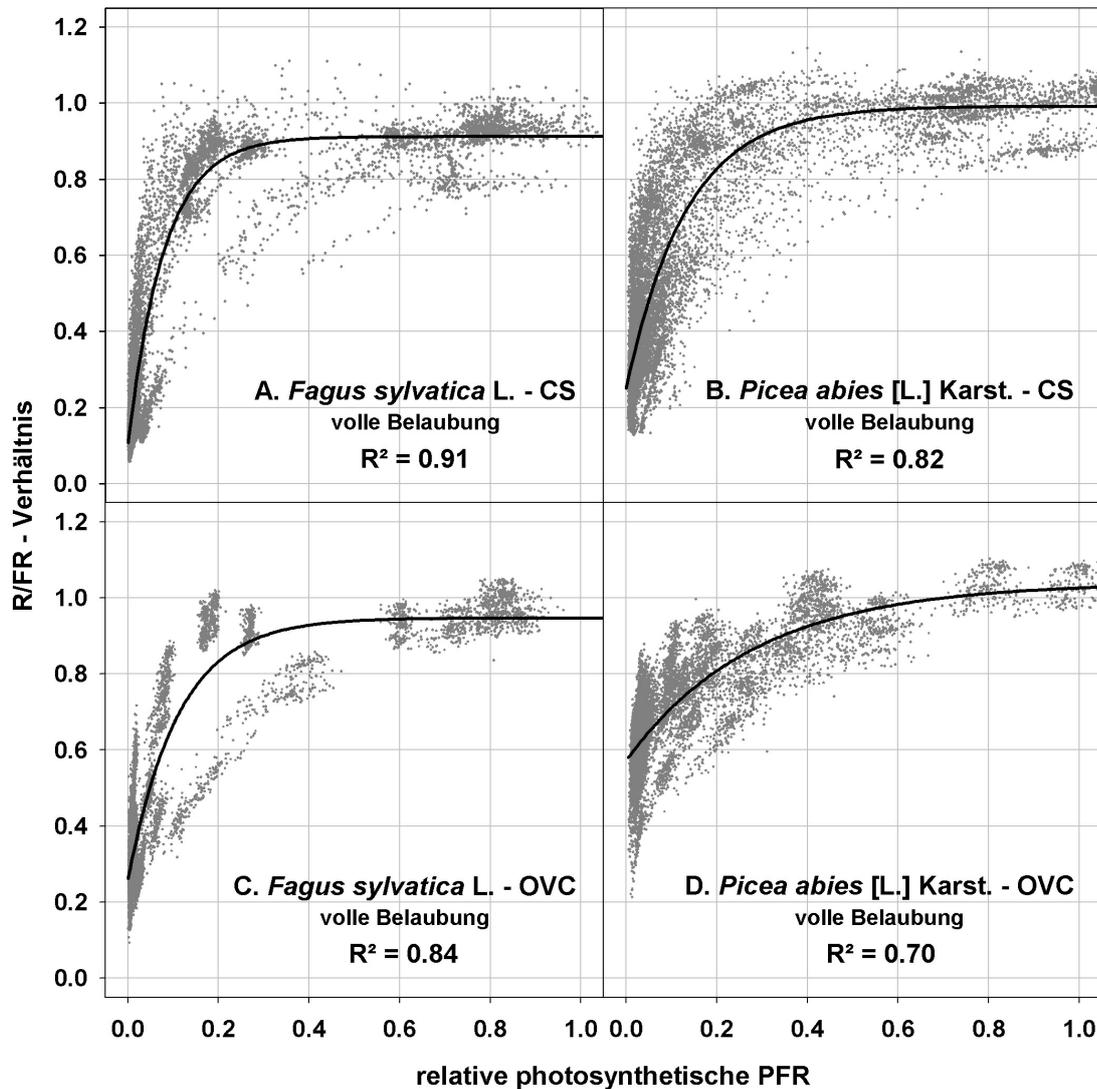


Abbildung 38: Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonenflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen bei voller Belaubung (Zeitraum: 07.07. – 15.07.2005)

Alle untersuchten Fälle zeigen einen exponentiellen Zusammenhang zwischen der $PPFR_{rel}$ und dem R/FR. Die Bestimmtheitsmaße liegen für die Buchenkrone in den drei belaubten Szenarien (S1 – S3) immer höher als in der Fichtenkrone. In S4 sind die Verhältnisse erwartungsgemäß umgekehrt, da die spektral selektive Absorption durch Buchenblätter im Gegensatz zu den Nadeln der immergrünen Fichten wegfällt. Bei Fichte und Buche ist der Zusammenhang an wolkenlosen Tagen größer als an bewölkten. In der Fichtenkrone sind die Werte für R^2 über den gesamten

betrachteten Zeitraum ziemlich konstant bei $0,80 \pm 0,02$ (CS) bzw. $0,70 \pm 0,02$ (OVC), was vom immergrünen Charakter der Baumart abhängt. Im Jahresverlauf liegt der maximale Zusammenhang ($R^2 = 0,91$ bei CS bzw. $0,84$ bei OVC) in der Buche bei S2 und der minimale ($0,75$ bzw. $0,54$) in unbelaubtem Zustand (S4). Das höchste Bestimmtheitsmaß aller Fälle findet man bei voller Belaubung (S2) und CS-Bedingungen in der Buchenkrone.

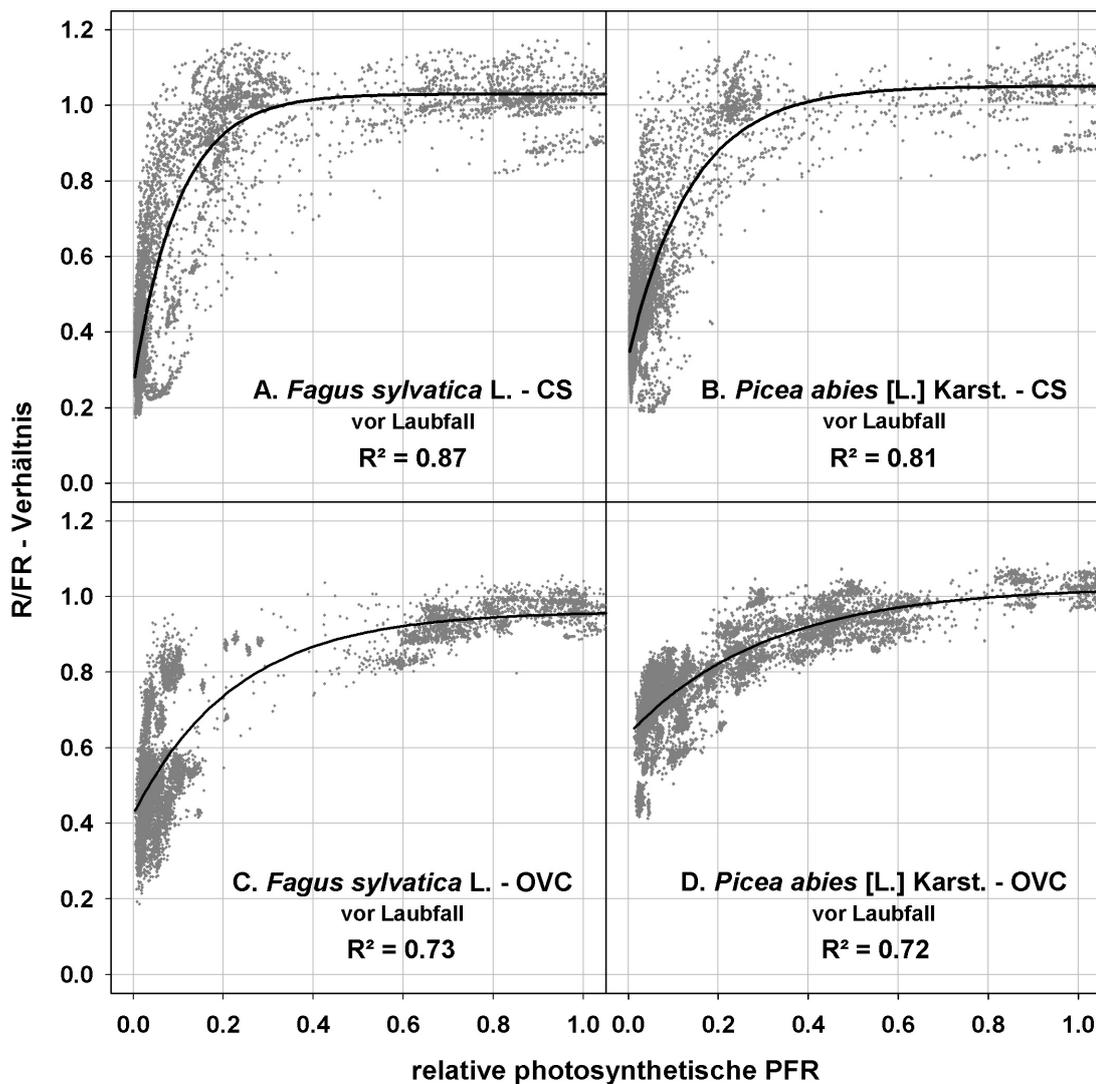


Abbildung 39: Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonenflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen vor dem Laubfall der Buche (Zeitraum: 14.10. – 24.10.2004)

Die betrachteten Beziehungen zwischen $PPFR_{rel}$ und R/FR lassen Rückschlüsse auf das Verhalten der photomorphogenetisch aktiven Strahlung, ausgedrückt als R/FR, zu. Bei der Buche spielen sowohl das phänologische Stadium als auch die meteorologischen Rahmenbedingungen eine wichtige Rolle, bei der Fichte ist kein ausgeprägter Jahresgang erkennbar. Bei der Buche werden in den Stadien S1–S3 die R/FR-Maximalwerte bereits bei niedrigeren $PPFR$ Anteilen erreicht, d.h. der Anstieg des R/FR ist mit zunehmendem Anteil der Strahlung an der Freilandstrahlung steiler als bei der Fichte (Abb. 37–39) und als im unbelaubten Zustand (Abb. 40), was sich in den höheren Werten des für die Krümmung hauptverantwortlichen Parameters b widerspiegelt. Dieser Parameter nimmt Maximalwerte unter CS-Bedingungen und bei S2 von 0,81 ein. Die niedrigsten gemessenen R/FR Werte sind ebenfalls in der Buchenkrone zu finden. In einigen Fällen nimmt das R/FR Werte von kleiner 0,10 an (Abb. 38 A). Die niedrigsten Werte der Fichtenkrone liegen in Abb. 38 B bei knapp 0,15, unterschreiten aber in allen anderen Fällen 0,20 kaum. Im unbelaubten Zustand kann in der Buchenkrone ein komplett differenziertes Bild beobachtet werden. Reichen die niedrigsten Werte für das R/FR bei CS-Bedingungen noch bis 0,41, so kann bei OVC-Bedingungen mit 0,69 eine Untergrenze identifiziert werden. In der Gleichung wird dies durch höhere Werte des Interzepts a ausgedrückt. Die Spannen der R/FR-Wertebereiche sind in Tab 7 aufgelistet.

Bei der Fichte nivelliert sich das Sättigungsniveau der exponentiellen Funktion bei einem R/FR von $1,00 \pm 0,06$ für alle Bedingungen ein, während bei der Buche eine jahreszeitliche Variation beobachtet werden kann. Von S1 bis S4 steigt bei beiden Bewölkungssituationen das Maximum an. Die niedrigen R/FR Werte bei hohen $PPFR_{rel}$ in S1 und S2 sind in erster Linie auf eine höhere Reflexion im Dunkelrot in den frisch ausgetriebenen Blättern zurückzuführen, die von den raumintegrierenden Sensoren miteinbezogen wird.

In Bezug auf die meteorologischen Bedingungen kann insbesondere bei Fichten, aber auch bei den Buchen, ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Bewölkungssituationen beobachtet werden. Bei OVC-Bedingungen trägt Strahlung, die nicht mit der Biomasse wechselgewirkt hat, einen größeren Anteil zur $PPFR_{rel}$ bei als bei CS-Bedingungen. Aus diesem Grund sind die Werte für R/FR bei niedrigen $PPFR_{rel}$ unter bewölktem Himmel höher. Die exponentielle Regressionskurve nimmt daher einen flacheren Verlauf, was sich in den niedrigeren Werten des Parameters b widerspiegelt.

Die von CAPERS UND CHAZDON [2004] vorgeschlagene Methode zur schnellen und einfachen Erfassung von Lichtniveaus aus R/FR Messungen scheint unter den hier vorliegenden Bedingungen insbesondere für die laubabwerfende Buche nicht direkt übertragbar. Zum einen sind die jahreszeitlichen Variabilitäten in einem gemäßigten Bestand nicht unmittelbar vergleichbar mit immergrünen Laubwäldern, zum anderen spielen die unterschiedlichen Messmethoden (Messung aus dem gesamten

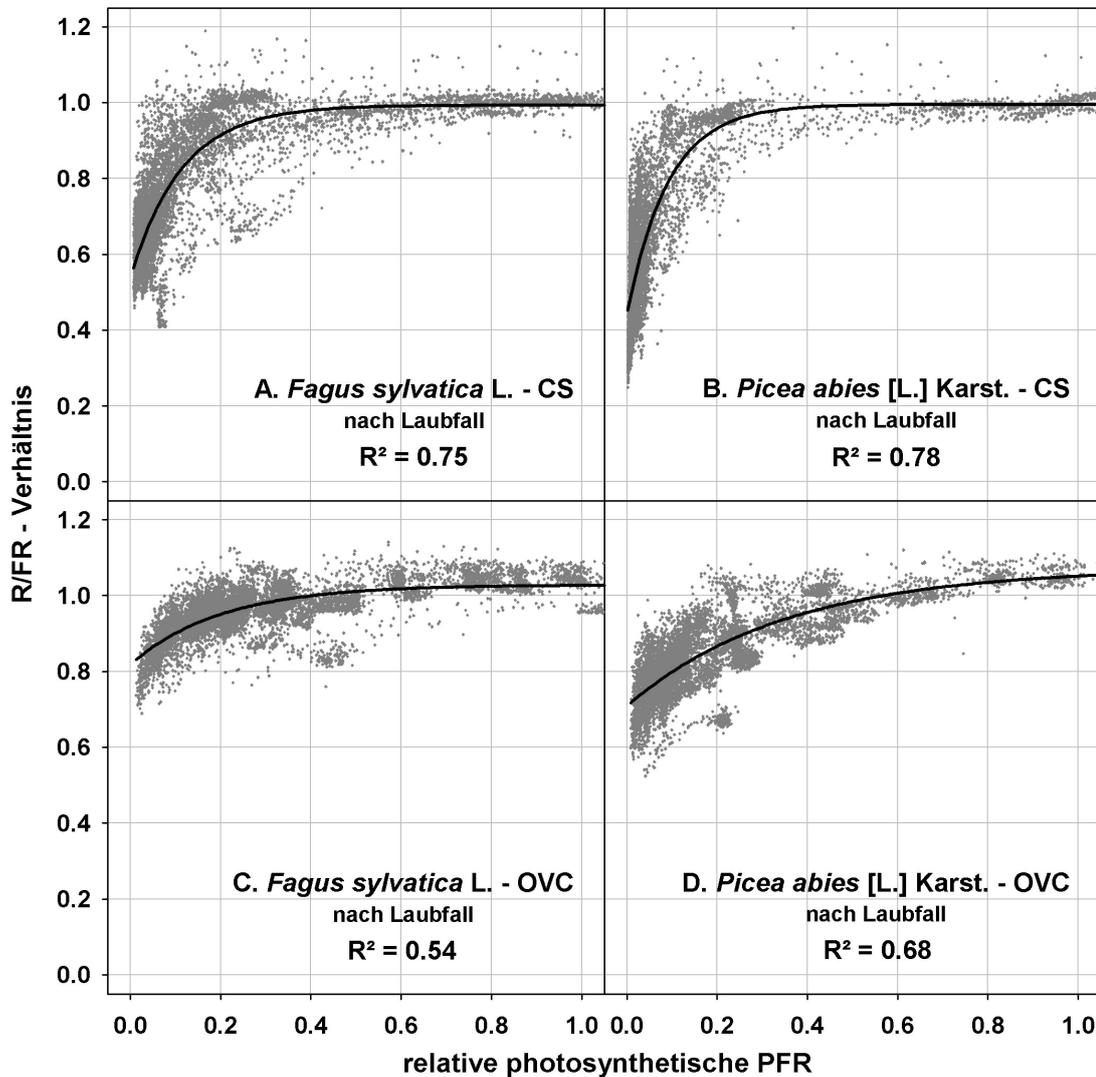


Abbildung 40: Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonenflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen nach dem Laubfall der Buche (Zeitraum: 14.11. – 21.11.2004)

Raumwinkel vs. planare Fläche) eine gewisse Rolle. Eine Quantifizierung der Unterschiede ist aus den vorliegenden Ergebnissen allerdings nicht möglich, da für die kosinusgetreue Messung keine spektralen Informationen vorliegen. Nichtsdestotrotz ist eine Abschätzung der photomorphogenetisch aktiven aus der photosynthetisch aktiven Strahlung unter Berücksichtigung der verschiedenen Rahmenbedingungen (Bewölkung, phänologische Phase, Baumart) möglich.

Variante	Parameter				
	a	b	c	R ²	N
Buche CS, nach Austrieb (S1)	0,14	0,68	7,57	0,83	8364
Buche OVC, nach Austrieb (S1)	0,24	0,65	7,64	0,74	12300
Fichte CS, nach Austrieb (S1)	0,29	0,66	8,08	0,79	7958
Fichte OVC, nach Austrieb (S1)	0,52	0,43	5,11	0,69	4186
Buche CS, volle Belaubung (S2)	0,10	0,81	12,47	0,91	15286
Buche OVC, volle Belaubung (S2)	0,26	0,69	8,99	0,84	10340
Fichte CS, volle Belaubung (S2)	0,25	0,74	7,55	0,82	14350
Fichte OVC, volle Belaubung (S2)	0,57	0,47	3,52	0,70	9496
Buche CS, vor Laubfall (S3)	0,26	0,77	9,88	0,87	9280
Buche OVC, vor Laubfall (S3)	0,42	0,54	4,35	0,73	15892
Fichte CS, vor Laubfall (S3)	0,33	0,72	7,14	0,81	8000
Fichte OVC, vor Laubfall (S3)	0,63	0,39	3,27	0,72	11850
Buche CS, nach Laubfall (S4)	0,54	0,45	8,77	0,75	9280
Buche OVC, nach Laubfall (S4)	0,82	0,21	5,00	0,54	9222
Fichte CS, nach Laubfall (S4)	0,44	0,56	10,95	0,78	8000
Fichte OVC, nach Laubfall (S4)	0,71	0,36	2,85	0,68	7950

Tabelle 8: Parameterwerte, Bestimmtheitsmaße und Anzahl der Fälle der in den Abb. 37–40 und Gleichung 20 ermittelten Regressionen zwischen photosynthetisch und photomorphogenetisch aktiver Strahlung

3.3.4 Strahlungsgrößen als Maß für phänologische Entwicklungsstadien am Beispiel Laubaustrieb und Laubfall der Buche

Die Untersuchung von saisonalen Veränderungen des Strahlungsfeldes speziell im Hinblick auf phänologische Entwicklungsphasen ist ein Ziel dieser Arbeit. Hierfür werden die beiden Übergangsstadien, also der Laubaustrieb und der Laubfall der Buche, näher betrachtet.

Abb. 41 zeigt exemplarisch den Laubfall der Buche. Dargestellt sind Vertikalprofile der $PPFR_{rel}$ an verschiedenen Tagen um 12:00 h MEZ während des Laubfalles für Buche und Fichte bei CS- und OVC-Bedingungen. Die Strahlungsextinktion in der Krone ist bei wolkenlosem Himmel größer, da bei bewölktem Himmel ein höherer Anteil diffuser Strahlung vom oberen Halbraum in die Krone eindringt. Während bei der Fichte im zeitlichen Verlauf erwartungsgemäß kaum Veränderungen sichtbar werden, zeigt die Buche ein steigendes Strahlungsangebot in der Krone mit zunehmendem Laubfall und damit verbundener höherer Transmission.

Im Allgemeinen wird die Bestimmung der Austriebs- und Seneszenzstadien durch Bonituren vorgenommen. Dabei wird jedem Baum, in diesem Fall der Buche, im entsprechenden Bestand in kurzen Abständen vor, während und nach dem Austrieb

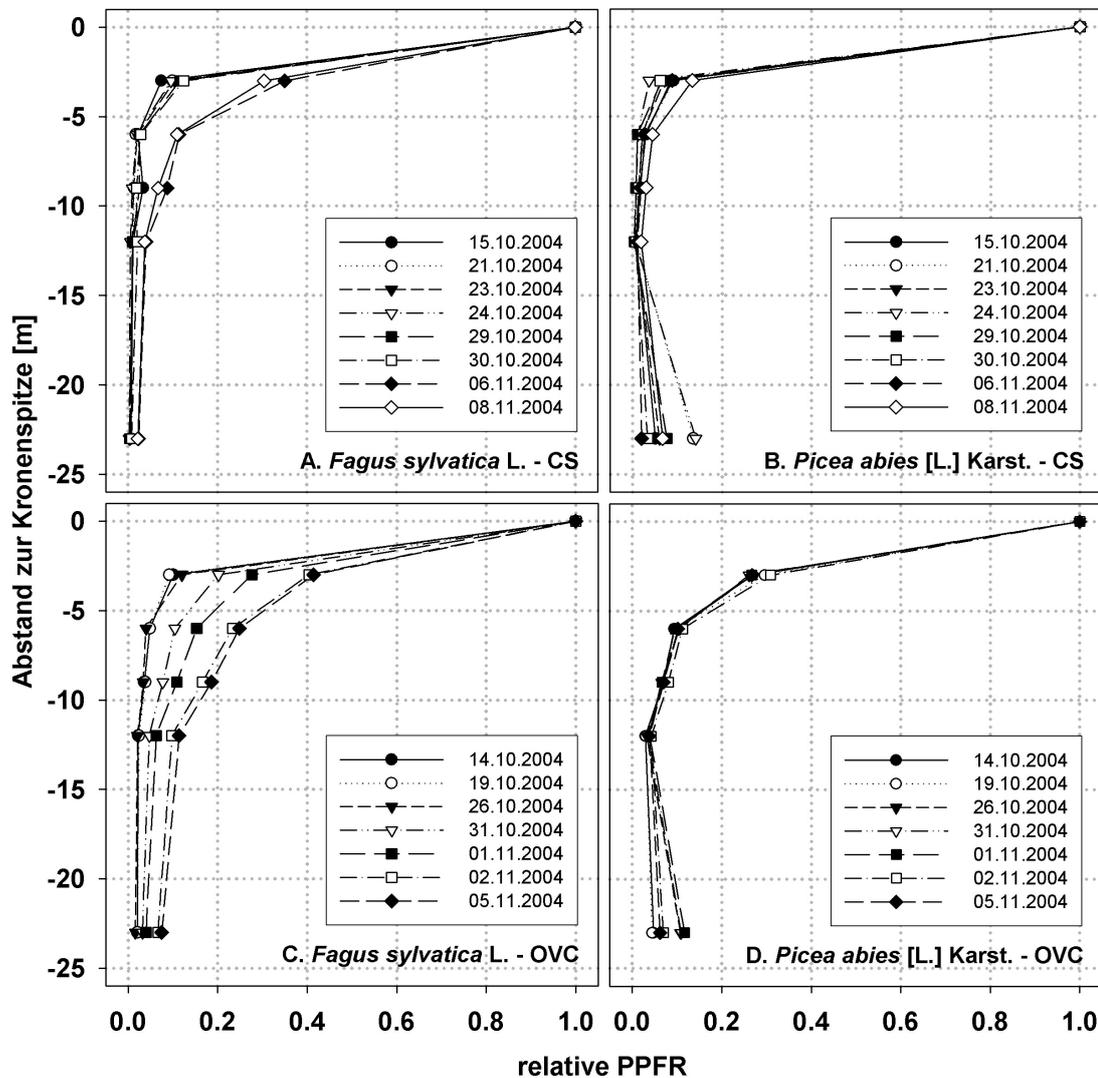


Abbildung 41: Vertikalprofile der relativen Photonenflussrate (PPFR_{rel}) während des Laubfalls der Buche 2004, gemessen um 12:00 h MEZ bei wolkenlosem (CS; A, C) und vollständig bewölktem (OVC; B, D) Himmel, betrachtet für Fichte (C, D) und Buche (A, B)

bzw. Laubfall einzeln eine Austriebs- bzw. Seneszenzstufe zugeordnet. Die Austriebsstufe ist ein morphologisches Maß, das sich auf zwei Drittel der Knospen eines Baumes bzw. einer Baumregion (Sonnen-/Schattenkrone) bezieht. Die Austriebsstufen nehmen einen Bereich von 0 (Winterknospen) bis 6 (Blätter voll entwickelt, Langtrieb abstehend) ein [NUNN, 2004]. Die Seneszenzstufe ist im Gegensatz dazu ein reines Schätzmaß, d.h. sie beschreibt den Grad der Blattverfärbung bzw. des Laubfalles. Der Wertebereich liegt hierbei zwischen 0 (alle Blätter grün und am Baum) und 10 (100% des Laubes gelb/braun oder abgefallen). Die in Abb. 42 verwendeten

Boniturdaten [LÖW UND WEIGT, 2005] wurden durch Mittelwertbildung aus den Einzelbaumdaten gebildet und können somit das Entwicklungsstadium des Gesamtbestandes charakterisieren. Im Folgenden wird gezeigt, dass mit deutlich niedrigerem Aufwand eine näherungsweise Betrachtung durch Untersuchung des spektralen Strahlungsfeldes erfolgen kann.

Das Strahlungsfeld wird durch zwei Parameter repräsentiert, die getrennt voneinander als möglicher Austriebs- bzw. Seneszenzindikator dienen sollen. Einer der Parameter ist die $PPFR_{rel}$, die aufgrund möglicher Variationen durch Lichtflecken bei Einzelmessungen zu Tagesmittelwerten zusammengefasst wird. Als Zeitraum für einen Tag wird die Periode von 09:00 – 15:00 h MEZ herangezogen, um mögliche Einflüsse durch niedrige Sonnenstände morgens oder abends auszuschließen. Für den Austrieb wurde der Zeitraum vom 17.04. – 16.05.2005, für den Laubfall die Tage vom 14.10. – 05.11.2005 betrachtet. Es wurden für alle Tage jeweils alle 25 Vertikalprofile berechnet und untersucht. Die Abb. 42 A – D zeigen exemplarisch den Verlauf eines Vertikalprofils in der Buchenkrone bei Laubaustrieb und Laubfall.

In Abb. 42 B sind für den Zeitraum des Laubaustriebs die Tagesmittelwerte von $PPFR_{rel}$ in vier verschiedenen Höhen (3 m, 14 m, 17 m, 20 m) im Vergleich mit der Austriebsstufe dargestellt. Die Standardabweichungen sind durch vertikale Fehlerbalken gekennzeichnet. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Tagesmittelwerten der $PPFR_{rel}$ wurde die Achse der Austriebsstufe gedreht. Der Zeitraum vom 17.04. bis zum 30.04. ist in allen Ebenen durch geringe Variabilität gekennzeichnet. Diese ist auf meteorologische Unterschiede, insbesondere den Bewölkungsgrad, zurückzuführen. Ab dem 01.05. ist ein zuerst steiler, dann ab dem 03.05. langsamer kontinuierlicher Abfall zu beobachten, der auf die Blattentfaltung der Buche zurückzuführen ist. Die geringen Schwankungen nach dem 03.05. sind wieder durch die variablen meteorologischen Rahmenbedingungen erklärbar. Die Austriebsstufe zeigt einen ähnlichen sigmoidalen Verlauf. Der Anstieg (Absinken in der Grafik), der das Entwicklungsstadium des Laubaustriebs widerspiegelt, beginnt jedoch bereits am 21.04. mit einem Maximum zwischen 29.04. und 03.05. und damit deutlich früher als durch die entsprechenden Strahlungswerte dargestellt wird. Eine lineare Korrelation zwischen den Tagesmittelwerten der $PPFR_{rel}$ und den Werten der Austriebsstufe ergab Bestimmtheitsmaße R^2 zwischen 0,30 und 0,60. Zur Abschätzung des Austriebsverlaufes anhand einzelner Messwerte sind diese Abhängigkeiten zu niedrig.

Ein ähnliches Verhalten kann beim Laubfall beobachtet werden. Dargestellt sind in Abb. 42 A die Tagesmittelwerte der $PPFR_{rel}$ in fünf Höhen (3 m, 14 m, 17 m, 20 m, 23 m) für ein Vertikalprofil der Buche sowie die Seneszenzstufe. Bis zum 30.10. halten sich die Werte relativ konstant mit leichter meteorologischer Variabilität. Die höhere Strahlungstransmission durch die Buchenkrone resultiert in einem steilen Anstieg der $PPFR_{rel}$ in allen Höhen aufgrund des Laubfalls, der am 31.10. beginnt. Nach dem 03.11. bleiben die Werte auf einem konstant hohen Niveau. Auch in diesem Fall geht der Anstieg der Seneszenzstufe zeitlich nicht einher mit der $PPFR_{rel}$, was sich an den relativ niedrigen Bestimmtheitsmaßen in der gleichen Größenordnung wie beim

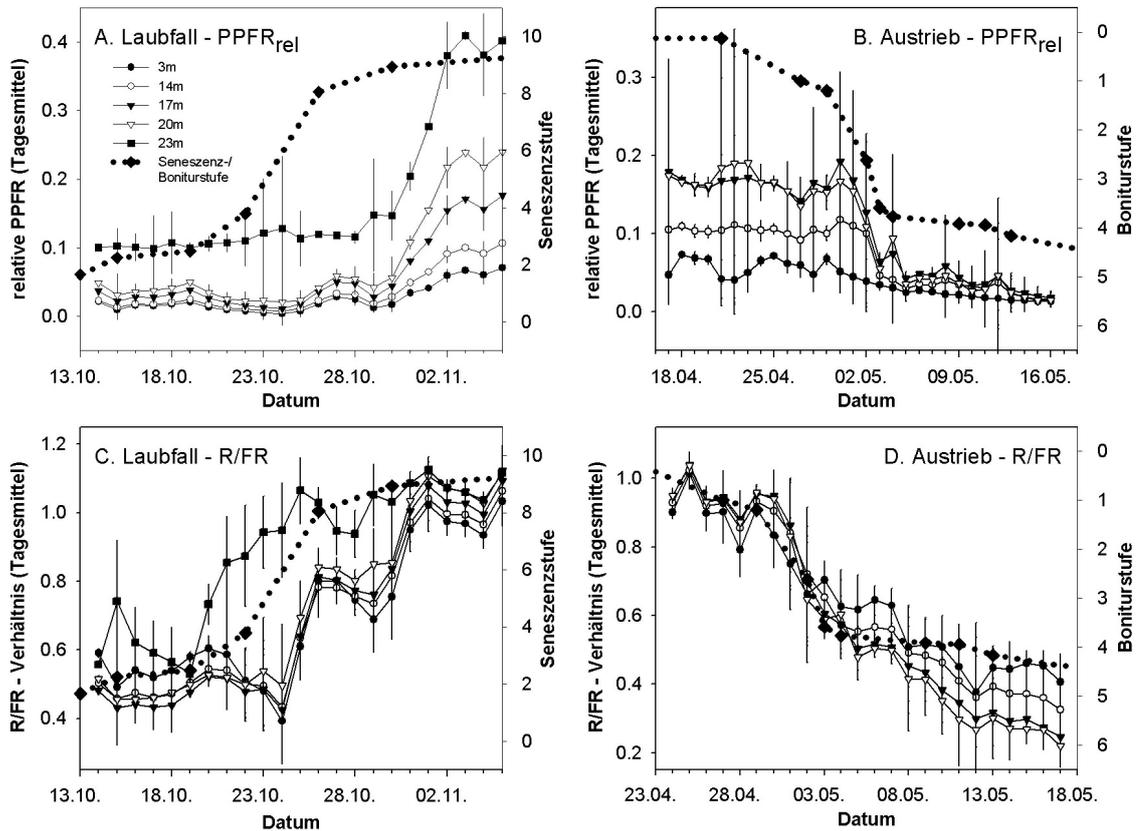


Abbildung 42: Tagesmittelwerte (09–15 h MEZ) von $PPFR_{rel}$ (A, B) und R/FR (C, D) im Verlauf des Laubfalls (A, C) und des Laubaustriebs (B, D) der Buche im Vergleich mit Boniturstufen (Seneszenzstufe, Austriebsstufe). Seneszenz- und Austriebsdaten erhoben von Markus Löw und Rosemarie Weigt, Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen.

Austrieb ausdrückt. Die $PPFR_{rel}$ kann lediglich die erhöhten transmittierten Strahlungsflüsse durch Abfallen des Laubes messen, jedoch nur eingeschränkt Hinweis auf die Seneszenzstufe geben, die auch die Blattverfärbung bereits mit einbezieht.

Ein Instrument zur Verbesserung der Abschätzung ist das R/FR , da es als Indikator für Pflanzenschatten und damit für Kronendichte dient [VARLET-GRANCHER ET AL., 1993]. Abb. 42 D zeigt den Laubaustrieb anhand der Tagesmittelwerte (09:00–15:00 h MEZ) des R/FR und der Austriebsstufe. Die Darstellung entspricht der in Abb. 42 B. Das R/FR umfasst zu Beginn in allen Höhen relativ einheitliche Werte zwischen 0,90 und 1,05 die auf Werte zwischen 0,22 und 0,47, mit etwas größerer Streuung gegen Ende des Austriebs, abfallen. In Abb. 43 B sind die beiden Größen R/FR und Austriebsstufe gegeneinander aufgetragen. Eine lineare Korrelation zeigt, dass mit hohen Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,93$ bzw. 0,94 das Austriebsstadium sehr gut durch das R/FR abgeschätzt werden kann. Die Abbildung wird ergänzt

durch das 95 %- Konfidenzintervall der Werte in 17 m Höhe. Alle anderen untersuchten Profile unter Buche verhielten sich ähnlich mit Bestimmtheitsmaßen immer über 0,90. Wie erwartet stellen sich bei der Fichte geringere Abhängigkeiten ein, die vor allem auf die Veränderung des Strahlungsklimas durch den Buchenaustrieb zurückzuführen sind. Aufgrund ihrer Eigenschaft als immergrüne Baumart soll daher keine nähere Untersuchung stattfinden.

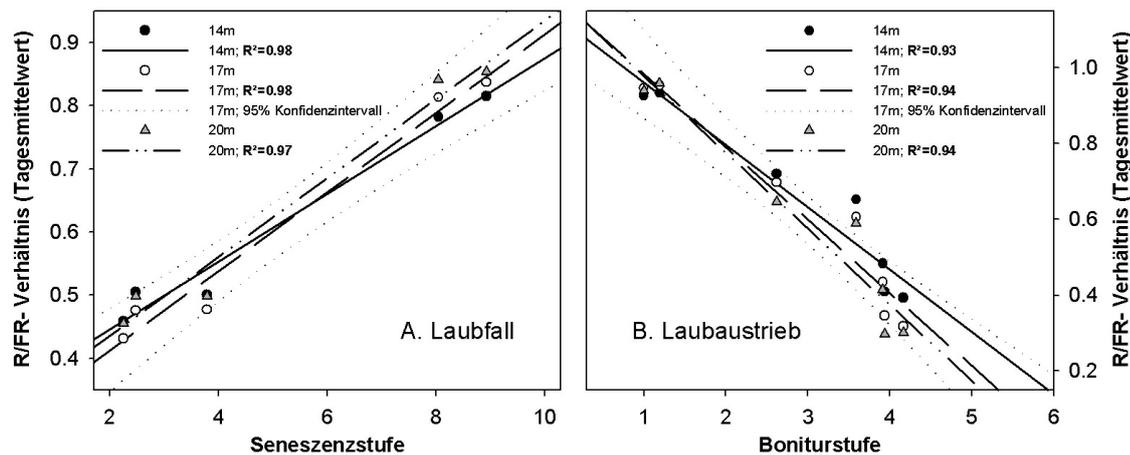


Abbildung 43: Korrelation zwischen den gemessenen Tagesmittelwerten vom R/FR und den durch Bonitur ermittelten Werten für Seneszenz- (A) bzw. Austriebsstufe (B). Dargestellt sind die Werte in drei Ebenen in der Krone (14 m, 17 m, 20 m), die Regressionsgeraden und das 95 %- Konfidenzintervall in 17 m Höhe.

Beim Laubfall, dargestellt in Abb. 42 C, zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Die untersten vier Höhen (3 m – 20 m) zeigen einen identischen Verlauf mit R/FR-Werten zwischen 0,40 und 0,55 bis zum 24.10. Ab diesem Zeitpunkt bis zum 02.11. steigt das R/FR auf Werte zwischen 0,90 und 1,10, was in etwa der unveränderten Strahlung über dem Bestand entspricht. Der Verlauf geht einher mit dem sigmoidalen Anstieg der Seneszenzstufe. In Abb. 43 A ist gleichermaßen wie in Abb. 43 B die lineare Korrelation zwischen R/FR und der Seneszenzstufe dargestellt. Die Bestimmtheitsmaße von 0,97 und 0,98 liegen beim Laubfall nochmal knapp über denen beim Austrieb. Dies kann bei den meisten Profilen festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet die Höhe 23 m, die bereits ab dem 19.10. steil ansteigt. Dies liegt an der Position in der Sonnenkrone. Sie zeigt aufgrund der fehlenden dichten darüberliegenden Belaubung bereits die ersten Anzeichen der Seneszenz auf, die in der Schattenkrone oder am Boden noch nicht wahrgenommen werden können. Die Korrelation mit der Seneszenzstufe ergab deutlich niedrigere Werte des Bestimmtheitsmaßes (0,4–0,6).

Die Beobachtungen zeigen, dass das R/FR ein guter Indikator für Austrieb und Laubfall sein kann. Es ist in der Lage, bereits die Blattverfärbung anzuzeigen. Im Vergleich dazu kann das PPFR erst später den tatsächlichen Blattverlust abbilden. Der Grund für die Eigenschaften des R/FR ist die abnehmende Photosyntheseleis-

tung durch Entziehen des Chlorophylls aus den Blättern. Dadurch steigt der hellrote Anteil des Spektrums relativ zum dunkelroten und damit das R/FR. Die erhöhte Transmission und Reflexion der Blätter liegt an Absorptionsmaxima der Blattpigmente im Hellrot-Bereich (siehe Kap. 2).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse an den Vertikalprofilen der Buche, dass bereits ein beliebiger R/FR-Sensor in der Schattenkrone ausreichend sein kann, sowohl den Laubaustrieb als auch den Laubfall im Sinne von Austriebs- und Senseszenzstufe näherungsweise zu quantifizieren. Die Werte am Bestandesboden zeigen ebenfalls eine hohe Abhängigkeit, werden jedoch im vorliegenden Bestand durch seitlich einfallende Strahlung nicht vernachlässigbar beeinflusst. In dichteren Beständen bzw. Reinbeständen ist eine Bestimmung durch Messungen am Bestandesboden ebenso vorstellbar.

3.3.5 Meteorologisch bedingte Einflüsse auf das Spektrum

Es wurde bereits mehrfach angedeutet, dass Faktoren wie beispielsweise Bewölkungsgrad und Art der Bewölkung, atmosphärischer Aerosolgehalt und Sonnenhöhe eine wichtige Rolle für die Quantität und Qualität des Strahlungsfeldes an der Erdoberfläche und somit über einem Pflanzenbestand spielen [FEDERER UND TANNER, 1966]. Damit wird auch die Menge und die spektrale Zusammensetzung der Photonenflussrate in einem Bestand maßgeblich beeinflusst [GRANT, 1997].

Der Einfluss von Wolken auf das eintreffende Spektrum wird in Abb. 44 verdeutlicht. Exemplarisch sind die spektralen PFR (Abb. 44 A) als Ausdruck für die Strahlungsquantität bzw. die relativen spektralen PFR (Abb. 44 B) für die spektrale Zusammensetzung an vier Zeitpunkten zwischen 12:30 h und 12:57 h MEZ an einem Tag mit schnell wechselnden Strahlungsbedingungen (15.10.2004) dargestellt. Die Menge der PFR unterscheidet sich in den vier Messungen erheblich. Als Maß für die in Abb. 44 A abgebildeten Quantitäten wurden in Abb. 44 B Werte der PFR angegeben, die von $333 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ um 12:30 h bei vollständiger Verdeckung der Sonne durch Wolken bis $1395 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ um 12:57 h bei Sonnenschein reichen. Die Zusammensetzung der Spektren (Abb. 44 B) variiert mit dem Auftreten von sonnigen oder bewölkten Perioden. Die Wolken verringern die gesamte PFR und verändern die Spektren in Richtung leicht erhöhter Blauanteile [SMITH, 1982, FEDERER UND TANNER, 1966]. Dies ist auf eine Reduktion der direkten Einstrahlung und eine Erhöhung der gestreuten Komponente zurückzuführen [AMMER, 2000, GRANT, 1997, SMITH UND MORGAN, 1981]. Dichtere Wolken agieren als nicht-selektiver Diffusionsfilter, was die leichten Modifikationen in den längerwelligeren Bereichen erklärt [SMITH, 1982].

Unter anderem in den Arbeiten von SMITH [1982] und ZEIGER [1981] wurde die mögliche Bedeutung der spektralen Veränderungen bei niedrigen Sonnenständen für physiologische und morphologische Prozesse in den Pflanzen hervorgehoben. Gerade in seitlich offenen Beständen und an Bestandesrändern können zu Sonnenauf-

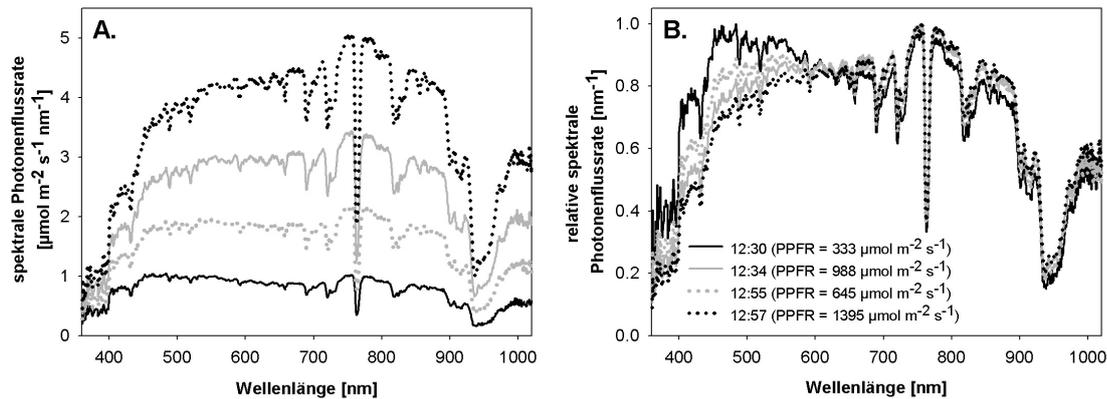


Abbildung 44: Spektrale Photonflussraten (A) und relative spektrale Photonflussraten (B) an vier Zeitpunkten am 15.10.2004 bei wechselnden Bewölkungssituationen. In der Legende sind die absoluten Werte der PPFR angegeben.

bzw. Sonnenuntergang deutliche Photonenströme eindringen, die einerseits mit herkömmlichen Planarsensoren nicht gemessen werden können, andererseits mit einem deutlich veränderten Spektrum jene Prozesse in der Pflanze auslösen können. Gerade diese sogenannten end-of-day-effects und deren Signalwirkung liefern in der Literatur widersprüchliche und sehr artspezifische Ergebnisse [SMITH, 1982, ZEIGER ET AL., 1981].

Als Beispiel für die spektrale Veränderung bei niedrigem Sonnenstand, zeigt Abb. 45 einen Sonnenuntergang vom 15.10.2004 in acht Stufen zwischen 15:00 h und 17:00 h MEZ. Es handelt sich dabei zur besseren Veranschaulichung der spektralen Zusammensetzung um die Darstellung der relativen spektralen PFR. Zur besseren Übersicht wurden die acht Spektren auf zwei Grafiken aufgeteilt. Das erste dargestellte Spektrum, gemessen um 15:00 h, weist die typischen Charakteristika bei wolkenlosem Himmel auf. Bereits fünf Minuten später setzt eine Veränderung ein, die bis ca. 16:32 h anhält. Der Blauanteil des Spektrums wird drastisch reduziert, während relativ dazu der Rot-, Dunkelrot- und nahe Infrarotanteil erhöht wird. Der Grund dafür liegt in dem vergrößerten Weg, den die Photonen bei niedrigerem Sonnenstand in der Atmosphäre zurücklegen müssen, und der damit verbundenen verstärkten spektral selektiven RAYLEIGH-Streuung, die kürzerwellige Strahlung stärker extinguiert (siehe Kap. 2). Die von der Sonne eintreffende direkte Strahlung erscheint dem menschlichen Auge damit rot.

Um 16:39 h beginnt die Sonne hinter dem Horizont zu verschwinden. Damit sinkt der Anteil direkter Strahlung am Spektrum und damit der Anteil längerwelliger Strahlung (Rot-nahes Infrarot). Der in erster Linie von der diffusen Strahlung beigetragene Blauanteil steigt relativ dazu an. Bis zum vollständigen Sonnenuntergang kehren sich die Verhältnisse um. Der relative Blauanteil steigt, der längerwellige sinkt. Um 16:57 ist die Sonne komplett hinter dem Horizont verschwunden. Der

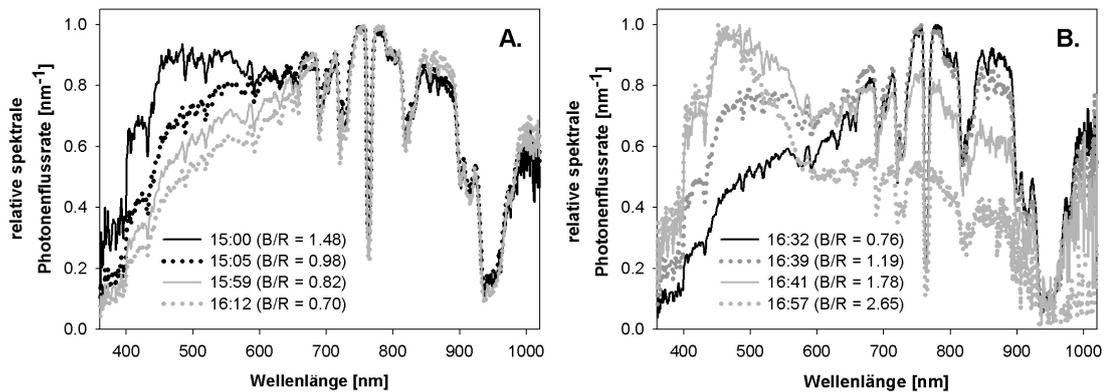


Abbildung 45: Relative spektrale Photonenflussraten im Verlauf eines Sonnenuntergangs am 15.10.2004 bei wolkenlosen Bedingungen über dem Bestand. In der Legende ist jeweils das Verhältnis vom Blau- zum Rotlichtanteil (B/R) angegeben.

Beitrag zum Spektrum wird nur noch durch gestreute Strahlung geleistet, die sich vermehrt aus den blauen Anteilen zusammensetzt. Als zusätzlicher Indikator für die spektralen Veränderungen während eines Sonnenunterganges ist das Verhältnis des blauen (400 nm – 490 nm) zum roten (650 nm – 740 nm) Anteil der PFR angegeben. Der Verlauf bestätigt die Beobachtungen einer Abnahme der blauen zugunsten der roten Wellenlängen mit fallender Sonnenhöhe. Das Blau-Rot-Verhältnis (B/R) fällt von 1,48 auf 0,70. Der Abnahme folgt ein steiler Anstieg des Verhältnisses auf einen Wert von 2,65 nach Sonnenuntergang.

Aus den Veränderungen der spektralen Zusammensetzung und damit auch photo-morphogenetisch aktiver Verhältnisse und Anteile (z.B. R/FR, B/R) innerhalb sehr kurzer Zeiträume läßt sich die Bedeutung für Pflanzen vermuten, jedoch müssen noch weitere Studien dazu erfolgen.

4 Dreidimensionale Modellierung der spektralen Strahlungsverteilung

Die Strahlungsmodellierung in Pflanzenbeständen wurde basierend auf unterschiedlichen theoretischen Konzepten in vielfacher Weise weiterentwickelt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Ansätze wurde in Kap. 1.2 durchgeführt. Im Folgenden soll das in dieser Arbeit verwendete Strahlungstransportmodell einschließlich der vorgenommenen Veränderungen erläutert werden. Neben der Beschreibung des Modells muss kurz auf die theoretischen Grundlagen der Strahlungstransporttheorie eingegangen werden (Kap. 4.1). Das Transportprogramm stammt in seiner ursprünglichen Form vom Institut für Bioklimatologie der Georg-August-Universität in Göttingen [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, KNYAZIKHIN ET AL., 1996, MIESSEN, 1994, KRANIGK ET AL., 1994, KRANIGK UND GRAVENHORST, 1993]. Es handelt sich um ein dreidimensionales Modell zur Simulation des PAR-Transportes in einem Fichten-Reinbestand. Eine detaillierte Ausführung zu Theorie und Modellbeschreibung kann bei KNYAZIKHIN ET AL. [1997] und MIESSEN [1994] gefunden werden. Die gesamte Modellierung erfolgte mit der Programmiersprache FORTRAN77.

4.1 Theoretische Grundlagen

Basierend auf der Arbeit von ROSS [1981] lässt sich das Strahlungsfeld in einem Pflanzenbestand durch eine dreidimensionale monochromatische Transportgleichung ähnlich der in Atmosphären (siehe Kap. 2.2.2) beschreiben [MIESSEN, 1994]. Die Lösung dieser Gleichung definiert die räumliche Verteilung und Richtungsverteilung des Strahlungsfeldes [KNYAZIKHIN ET AL., 1997]. Der Bestand wird dabei als trübes Medium abstrahiert, was durch eine Reduktion der Bäume auf ihre Blätter, unter Vernachlässigung von Ästen und Stämmen, ermöglicht wird. Für eine exakte Abschätzung müssen drei Input-Variablen sehr genau formuliert werden [ROSS, 1981]: die in den Bestand einfallende Strahlung, die Architektur des Bestandes und die optischen Eigenschaften (Absorption und Reflexion) der Vegetationskomponenten und des Bestandesbodens. Die Funktion, die das Strahlungsfeld in einem Bestand mit endlichen Abmessungen (X_s, Y_s, Z_s) charakterisiert, ist die von der Wellenlänge λ , dem Ort $\vec{r} = (x, y, z)$ und der Richtung $\vec{\Omega}$ abhängige monochromatische Intensitätsverteilungsfunktion $I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$ [KNYAZIKHIN ET AL., 1997]. Unter den Prämissen, dass die Intensität zeitunabhängig ist, bei der Streuung keine Frequenzverschiebung erfolgt, keine Emissionen stattfinden und Polarisierungseffekte vernachlässigbar sind, gilt für die stationäre monochromatische Intensitätsverteilungsfunktion unter Verwendung von kartesischen Koordinaten [MYNENI ET AL., 1991, ROSS, 1981]:

$$\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\sigma(\vec{r}, \vec{\Omega}) I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \int_{4\pi} \sigma_{s,\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\Omega'. \quad (21)$$

Der Ortsvektor \vec{r} entspricht dem Triplet (x, y, z) mit $(0 < x < X_s)$, $(0 < y < Y_s)$ und $(0 < z < Z_s)$. Der Richtungsvektor $\vec{\Omega} = (\mu, \phi)$ hat den Azimutwinkel ϕ und den Polar-

winkel $\theta = \cos \mu$ [KNYAZIKHIN ET AL., 1997]. Die linke Seite der Gleichung 21 stellt die Änderung der monochromatischen Intensität bei Bewegung in Richtung $\vec{\Omega}$ dar. Die rechte Seite setzt sich zusammen aus der Schwächung der Intensität durch Absorption und Streuung (erster Term) und der Stärkung aufgrund von Streuungsprozessen aus allen möglichen Raumrichtungen $\vec{\Omega}'$ in die betrachtete Richtung $\vec{\Omega}$ (zweiter Term) [MIESSEN, 1994]. Die Eigenschaften des dargestellten Baumbestandes werden durch die Funktionen $\sigma(\vec{r}, \vec{\Omega})$ und $\sigma_{s,\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ bestimmt. Erstere wird als Extinktionskoeffizient bezeichnet und gibt die Wahrscheinlichkeit pro Weglänge ds an, dass ein Photon auf diesem Weg auf ein Blattelement trifft und dann entweder gestreut oder absorbiert wird. Die Streueigenschaften werden durch den differentiellen Streukoeffizienten $\sigma_{s,\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ charakterisiert. Dieser beschreibt die Wahrscheinlichkeit pro Weglänge ds und Raumwinkel $d\Omega$, dass ein Photon auf dieser Wegstrecke aus Richtung $\vec{\Omega}'$ in einen Raumwinkel $d\Omega$ um $\vec{\Omega}$ gestreut wird [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994]. Die Herleitung dieser Wechselwirkungskoeffizienten erfolgt aus bestimmten optischen und strukturellen Eigenschaften der Blattelemente, die durch folgende Funktionen dargestellt werden [MIESSEN, 1994]:

- die Blattflächendichte $u_L(\vec{r})$, die die gesamte einseitige Oberfläche der Blattelemente pro Volumeneinheit angibt,
- die Blattnormalenverteilung $\frac{1}{2\pi} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L)$, die den Bruchteil der Elementfläche in einem Volumen um den Ort \vec{r} bestimmt, deren Normale in einem Raumwinkelement um Richtung $\vec{\Omega}_L$ liegt,
- die Blattstreuphasenfunktion $\gamma_{L,\lambda}(\vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$, die den Bruchteil der aus Richtung $\vec{\Omega}'$ kommenden Strahlung angibt, der an Blattelementen mit Flächennormalen $\vec{\Omega}_L$ in ein Raumwinkelement um $\vec{\Omega}$ gestreut wird.

Der Extinktionskoeffizient berechnet sich aus der Blattflächendichte und der Blattnormalenverteilung [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994, MYNENI ET AL., 1991, ROSS, 1981]:

$$\sigma(\vec{r}, \vec{\Omega}) = u_L(\vec{r}) G(\vec{r}, \vec{\Omega}), \quad (22)$$

$$G(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L) |\vec{\Omega}_L \bullet \vec{\Omega}| d\Omega_L. \quad (23)$$

Der Geometriefaktor $G(\vec{r}, \vec{\Omega})$ stellt den Bruchteil der gesamten Blattfläche in einem Volumenelement um \vec{r} dar, der senkrecht zur Photonenrichtung $\vec{\Omega}$ steht. Die Betrachtung beschränkt sich auf Blätter, deren Normale in die obere Hemisphäre gerichtet ist, unter der Voraussetzung, dass sich die Blätter nicht gegenseitig überschatten. Während der Extinktionskoeffizient ausschließlich von geometrischen Eigenschaften der Blattelemente abhängt und damit wellenlängenunabhängig ist, lässt sich der differentielle Streukoeffizient aus den optischen und den strukturellen Eigenschaften der Blattelemente berechnen und ist somit wellenlängenselektiv.

$$\sigma_{s,\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\pi} u_L(\vec{r}) \int_{2\pi^+} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L) |\vec{\Omega}' \bullet \vec{\Omega}_L| \gamma_{L,\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\Omega_L. \quad (24)$$

Die Trübheit des Mediums ist also durch die optischen Eigenschaften sowie durch die räumliche Verteilung und Orientierung der Blattelemente definiert [MIESSEN, 1994].

4.2 Modellbeschreibung

Das verwendete Strahlungstransportmodell berechnet die Strahlungsintensität in einer endlichen Anzahl von Punkten und Richtungen. Zur numerischen Bestimmung des Strahlungsfeldes in einem Baumbestand ist genaue Kenntnis über die Randbedingungen und Wechselwirkungskoeffizienten nötig. Hierfür müssen folgende Eingangsparameter berücksichtigt werden [MIESSEN, 1994]:

- die Architektur des Bestandes,
- die optischen Blatteigenschaften,
- die optischen Eigenschaften des Bestandesbodens,
- die meteorologischen Bedingungen,
- die Umgebung des modellierten Bestandes.

Zur räumlichen Diskretisierung wird der betrachtete Bestand in ein Gitternetz von quaderförmigen Zellen (Voxel) unterteilt. Die Anzahl und Größe der Zellen wird durch die Kantenlänge vorgegeben. Jedem dieser Voxel werden Werte für die Wechselwirkungskoeffizienten σ und $\sigma_{s,\lambda}$ zugeordnet, wobei die Koeffizienten über das gesamte Volumen des jeweiligen Voxels konstant gesetzt und somit als schrittweise konstante Funktionen (Treppenfunktionen) dargestellt werden [MIESSEN, 1994].

Die in dem Modell berücksichtigten Strahlungsflüsse beschränken sich auf den PAR-Bereich. Das Strahlungsfeld im Bestand setzt sich aus drei Hauptkomponenten zusammen: der ungestreuten direkten Sonnenstrahlung und der ungestreuten diffusen Himmelsstrahlung, d.h. aus Photonen, die nicht mit dem Bestand wechselgewirkt haben, und der im Bestand gestreuten Strahlung. Letztere wird von der einfach und mehrfach gestreuten Strahlung gebildet. Die einfach gestreute Strahlung besteht aus der im Bestand gestreuten direkten Strahlung, der am Bestandesboden gestreuten direkten Strahlung und aus der einmal gestreuten diffusen Strahlung. Zur Vereinfachung der Berechnung werden die gestreute diffuse Strahlung und die Mehrfachstreuung vernachlässigt. Die Auswirkungen der Vernachlässigung dieser beiden Komponenten wurde von MIESSEN [1994] untersucht. Im Modell wird die in den Bestand oben und seitlich einfallende Strahlung in einen diffusen und einen direkten Teil zerlegt. Der diffuse Anteil wird auf eine endliche Anzahl von Richtungen eingeschränkt.

Zur Berechnung der Intensitäten an den jeweiligen Zelleneckpunkten bestimmt das Modell die Voxel, durch die sich die einzelnen Strahlungskomponenten hindurchbewegen. Aus den zurückgelegten Wegstrecken wird die direkte und diffuse Strah-

lung kalkuliert, die ohne Wechselwirkung mit der Biomasse die ausgewählten Zellen durchdringt, und die einfach gestreute direkte Strahlung mit der entsprechenden Streurichtung bestimmt. Aus den Werten für die acht Eckpunkte wird die jeweilige mittlere Intensität eines Voxels berechnet. Der gleiche Vorgang erfolgt auch für die vom Bestandesboden reflektierte Strahlung. Somit erhält man für jeden Voxel einen Strahlungswert aus allen Raumrichtungen, was der in Kap. 2.1 beschriebenen PPFR entspricht.

4.3 Eingangsparmeter

Im vorangegangenen Kapitel wurden bereits die wichtigsten Eingangsparmeter aufgezeigt. Diese charakterisieren die Eigenschaften des Bestandes sowie der einfallenden Strahlung und legen die Diskretisierung der räumlichen und angularen Koordinaten fest. Im Folgenden sollen diese speziell für den Fichten-Buchen-Mischbestand im Kranzberger Forst angepasst beschrieben werden. REITMAYER [2000] unternahm einen ersten Schritt zur Adaption des auf Fichten-Reinbeständen entwickelten und angewandten Modells. Die begonnene Anpassung an einen Mischbestand wurde in der vorliegenden Arbeit fortgeführt und um zahlreiche Komponenten erweitert.

4.3.1 Architektur des Bestandes

Die Struktur des Bestandes als einer der wesentlichen Faktoren für die Bestimmung des Strahlungsfeldes beinhaltet die räumliche Verteilung und Ausrichtung der Elemente, mit denen die einfallende Strahlung wechselwirkt. Zur Beschreibung dieses Parameters werden im Modell die Blattflächendichte, definiert als Dichte der projizierten Blattflächen in $[\text{m}^2/\text{m}^3]$, und die Orientierung der Projektionsflächen, die Blattnormalenverteilung, herangezogen. Ein Baum wird dabei auf seine Blätter reduziert, was für den PAR - Bereich zulässig ist [ROSS, 1981].

Die Berechnung der Biomasseverteilung erfolgte durch SEIFERT [2005], basierend auf dem Wachstumsmodell BALANCE [GROTE UND PRETZSCH, 2002]. Grundlage für die Ermittlung der Biomasseverteilung bilden Daten von Baumpositionen, Stammdurchmesser (BHD), Baum- und Kronenansatzhöhen sowie Kronenradien aus Kronenablotungen aus dem Jahr 2002. Fehlende Daten wurden über Ergebnisse der Aufnahme von 1999 extrapoliert. Die Hochrechnung auf die aktuelle Biomasseverteilung wurde durch Regressionen in acht Kronenradien in 0,5 m Höhenstufen durchgeführt. Zum Einsatz kommen allometrische Gleichungen, die es zusammen mit baumindividuellen Verteilungsannahmen erlauben, Biomasse- und Laubflächen im Bestand räumlich zu schätzen [GROTE, 2002].

Die Versuchsfläche wurde in Kuben mit der Kantenlänge $l_k = 0,5 \text{ m}$ (Volumen $V_k = 0,125 \text{ m}^3$) eingeteilt und die jeweilige Blattfläche $A(x, y, z)$ in $[\text{m}^2/\text{Kubus}]$ am Ort (x, y, z) bestimmt. Die Blattflächendichte $u_L(x, y, z)$ in $[\text{m}^2/\text{m}^3]$ ist innerhalb

jedes Voxels konstant und berechnet sich aus:

$$u_L(x, y, z) = \frac{A(x, y, z)}{V_k}. \quad (25)$$

Für die Orientierung von Fichtennadeln wurde eine gleichförmige, keine Richtung bevorzugende sphärische Verteilung der Oberflächennormalen angenommen ($g_L = 1$) [COURBAUD ET AL., 2003, MIESSEN, 1994], d.h. in jede Richtung des oberen Halbraumes zeigt der gleiche Bruchteil der Flächennormalen. Die Abschätzung der Buchenblätternverteilung erfolgt mit Hilfe eines planophilen Ansatzes [WEISS ET AL., 2004, ROSS, 1981]. Der Geometriefaktor (siehe Kap. 4.1) erhält nach ROSS [1981] für die Fichte den Wert $\frac{1}{2}$, für die Buche wird er für jeden Vektor neu berechnet.

4.3.2 Optische Blatteigenschaften

In den Kapiteln 2.2.2 und 2.2.3 werden die prinzipiellen physikalischen Vorgänge der Absorption und Streuung von einfallender Strahlung in einem Medium wie der Atmosphäre oder einer Vegetationsdecke beschrieben. Diese Vorgänge sind an Blättern zum größten Teil spektral selektiv und von Einfallrichtung und -winkel abhängig. Die spektralen Eigenschaften variieren nicht nur zwischen den verschiedenen Baumarten, sondern auch mit Blattalter und Lage in der Baumkrone (Sonnen-/Schattenkrone, Exposition) erheblich [PANFYOROV ET AL., 2001, MIDDLETON ET AL., 1997, KNYAZIKHIN ET AL., 1997, WILLIAMS, 1991, DAUGHTRY ET AL., 1989, TANNER UND ELLER, 1985]. Die mathematische Beschreibung der Streueigenschaften erfolgt durch die in Kap. 4.1 eingeführte Blattstreuphasenfunktion γ_L , die sich anteilig aus der diffusen und der spiegelnden Streuung zusammensetzt.

Bei der wellenlängenselektiven diffusen Komponente streut die einfallende Strahlung kosinusverteilt einen Bruchteil in den Halbraum zurück (Reflexion) und einen weiteren Bruchteil in den gegenüberliegenden Halbraum (Transmission). Der Anteil an der einfallenden Strahlung wird als Reflexions- (r_L), bzw. Transmissionskoeffizient (t_L) bezeichnet. Aufgrund fehlender Messwerte im Kranzberger Forst werden für r_L und t_L Daten aus der Literatur herangezogen. Für Fichtenzweige wurden die Werte von KNYAZIKHIN ET AL. [1996] übernommen. Da das ursprüngliche Modell auf Fichten-Reinbestände beschränkt ist, musste eine Erweiterung für die Buche durchgeführt werden. TANNER UND ELLER [1985] untersuchten die spektralen Eigenschaften von Buchenblättern während einer ganzen Vegetationsperiode. Die Werte, die für die volle Belaubung ermittelt wurden, wurden im Modell implementiert. Jedem Voxel kann somit neben der Blattflächendichte auch eine Information über die Baumart und damit der entsprechende Wert für r_L und t_L zugewiesen werden.

Ein von VANDERBILT UND GRANT [1985] entwickeltes Modell, das die FRESNEL-Gleichung der Optik verwendet, berechnet den spiegelnden Anteil der Streuung [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994]. Diese Fraktion ist nicht wellenlängenselektiv.

4.3.3 Optische Eigenschaften des Bestandesbodens

Die untere Randbedingung der Transportgleichung (Gleichung 21) ist durch die am Bestandesboden reflektierte Strahlung gegeben. Die Reflexionseigenschaften des Bodens werden durch Wassergehalt, chemische Zusammensetzung, Rauigkeit, Ein- und Ausfallsrichtung sowie Wellenlänge der auftreffenden Strahlung bestimmt [MIESSEN, 1994]. Durch den relativ geringen Anteil an PAR, der auf dem Boden eintrifft und wiederum nur zu einem geringen Teil reflektiert wird, kann ein einfaches LAMBERTSches Modell herangezogen werden. Unabhängig von Richtung und Wellenlänge wird ein konstanter Anteil der Strahlung (r_B) isotrop in den Bestand zurückgestreut. Für die Modellierung wird der im Solling ermittelte Wert für die Waldbodenreflexion von $r_B = 0,07$ herangezogen [MIESSEN, 1994].

4.3.4 Meteorologische Bedingungen

Kap. 2.2.2 erläutert die Prozesse, die beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre mit ihr wechselwirken. Die Interaktion resultiert in einer Änderung der spektralen Zusammensetzung, der Winkelverteilung und der Intensität. Die auf den Bestand treffende Strahlung wird dabei in einen direkten und einen diffusen Anteil aufgeteilt. Die Größenordnung der Schwächung und die Winkelverteilung der diffusen Strahlung hängt dabei vom Bewölkungsgrad, dem Sonnenstand und der Trübheit der Atmosphäre ab. In dieser Arbeit werden die beiden Extremfälle, d.h. völlig bedeckter und unbewölkter Himmel, untersucht. In Ansätzen wurde das Programm bereits zur Betrachtung von Mischbedingungen erweitert, jedoch ist die theoretische Bestimmung der diffusen Strahlung bei beliebigem Bewölkungsgrad sehr komplex und bedarf weiterer Untersuchungen. An bewölkten Tagen (OVC) bestimmt das Modell die Verteilung der diffusen Strahlung am Himmel mit der Näherung des *Standard Overcast Sky* (SOC) [BRUNNER, 1998, MOON UND SPENCER, 1942]. An klaren, unbewölkten Tagen (CS) wird die Helligkeitsverteilung mit der Formel von POKROWSKI [1929] ermittelt.

Das Modell benötigt als Eingabe drei verschiedene Strahlungsgrößen. Diese werden jeweils über dem Bestand im Kranzberger Forst in 32 m Höhe auf einem der Gerüsttürme gemessen. Die erforderlichen Größen sind die Globalstrahlung (I_S) in $[\text{W m}^{-2}]$, die diffuse Himmelsstrahlung (I_H) in $[\text{W m}^{-2}]$ und die PAR (I_p) in $[\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$.

Die Fallunterscheidung über die meteorologischen Bedingungen wird in der aktuellen Modellversion aus dem Verhältnis (ψ) der Globalstrahlung und der Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre (I_X) bei Sonnenhöhe h an gleichem Ort und Zeitpunkt bestimmt:

$$\psi = \frac{I_S}{I_X} = \frac{I_S}{I_0 \sin h}. \quad (26)$$

Dabei wird zwischen CS- ($\psi > 0,70$), OVC- ($\psi \leq 0,35$) und Mischbedingungen (MIX, $0,35 < \psi \leq 0,70$) unterschieden. Die Grenzwerte ergeben sich aus den von

SPITTERS ET AL. [1986] angegebenen Bereichen sowie aus eigenen Beobachtungen. Damit kann zur Identifizierung der Bedingungen auf den diffusen Strahlungsinput verzichtet werden, da die bisherige Unterscheidung aus der Differenz zwischen den gemessenen Größen I_S und I_H ermittelt wurde. Bei einer Differenz von $I_S - I_H \leq 50 \text{ W m}^{-2}$ wurden OVC-, ansonsten CS-Bedingungen angenommen.

SPITTERS ET AL. [1986] ermittelten eine Beziehung zwischen I_H und ψ . In der vorliegenden Arbeit wurde diese empirisch entwickelte Beziehung an den Kranzberger Forst angepasst und zur Berechnung von I_H im Modell verwendet. Zur rechnerischen Bestimmung von I_H wird noch zusätzlich m_ψ , definiert als Tagesmittelwert von ψ , benötigt.

Es gilt für

$$\begin{aligned} \psi \leq 0,22 : I_H &= I_S, \\ 0,22 < \psi \leq 0,35 : I_H &= I_S (1,22 - \psi)^2, \\ 0,35 < \psi \leq k; m_\psi \leq 0,7 : I_H &= I_S (1,47 - 1,66 \psi), \\ 0,35 < \psi \leq k; m_\psi > 0,7 : I_H &= I_S (1,47 - 1,66 \psi)(1,7 - m_\psi)^3, \\ \psi > k; m_\psi \leq 0,7 : I_H &= I_S r, \\ \psi > k; m_\psi > 0,7 : I_H &= I_S r (1,7 - m_\psi)^3, \end{aligned} \quad (27)$$

mit

$$\begin{aligned} r &= 0,847 - 1,61 \sin h + 1,04 \sin^2 h, \\ k &= \frac{1,47 - r}{1,66}. \end{aligned}$$

Die Streuplots in Abb. 46 vergleichen die für das Jahr 2002 bzw. für den 26.07.2002 berechneten mit den gemessenen Werte von I_H ($R^2 = 0,78$ bzw. $R^2 = 0,93$). Die Betrachtung des Einzeltages im Juli 2002 zeigt die typischen Merkmale, die an den meisten Tagen vorliegen. Die simulierten Werte überschätzen die gemessenen bis etwa 300 W m^{-2} Intensität geringfügig. Höhere Werte werden eher unterschätzt. Dies wird in beiden Grafiken auch in der Steigung der Regressionsgeraden deutlich, die jeweils < 1 ist.

Unter OVC-Bedingungen spielt die Aufteilung in direkte und diffuse PAR keine Rolle, da erstere vernachlässigbar ist. Bei den CS-Bedingungen muss nach den beiden Komponenten des Strahlungsinputs aufgeteilt werden. Das Modell verwendet zur Bestimmung des diffusen PAR-Anteils ($I_{p,H}$) folgende, aus Messungen abgeleitete Beziehung zu I_S , I_H und I_p [SPITTERS ET AL., 1986]:

$$\frac{I_{p,H}}{I_p} = 1,4 \frac{I_H}{I_S} \quad (28)$$

Der direkte PAR-Anteil ($I_{p,D}$) ergibt sich aus der Subtraktion der diffusen von der Gesamt-PAR:

$$I_{p,D} = I_p - I_{p,H} = \left(1 - 1,4 \frac{I_H}{I_S}\right) I_p. \quad (29)$$

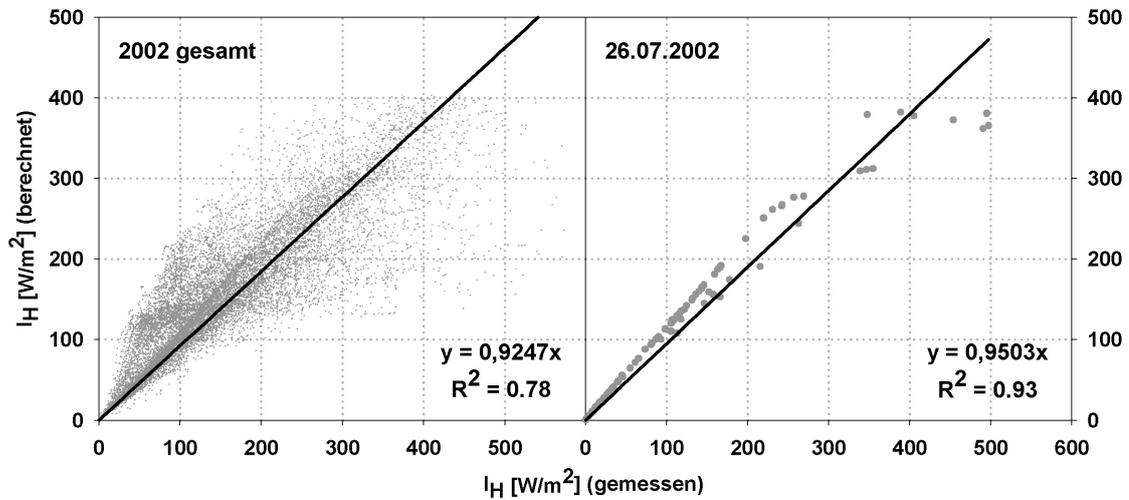


Abbildung 46: Streuplots berechneter und gemessener diffuser Strahlung (I_H) für das gesamte Jahr 2002 und für den 26.07.2002.

Die diffuse PAR wird auf die einzelnen Raumrichtungen, in denen das Strahlungsfeld berechnet werden soll, aufgeteilt.

4.3.5 Umgebung des Bestandes

Die seitlich in den modellierten Bestandesausschnitt einfallende Strahlung hängt von den Randbedingungen ab. Die seitlichen Grenzflächen werden durch ein eindimensionales Modell, das dem dreidimensionalen Modell vorgeschaltet ist, berechnet. Dies erfolgt durch eine Mittelung der Bestandesstruktur über die x-y-Ebenen. Die modellierte Fläche wurde für diese Arbeit erweitert. Damit spielen die seitlichen Grenzflächen nur eine untergeordnete Rolle, da der untersuchte Kernbereich weit genug von den Seitenwänden des Bestandesquaders entfernt liegt und somit kaum durch die Randbedingungen beeinflusst wird.

4.3.6 Diskretisierung

Die möglichen Richtungen der einfallenden Strahlung werden auf fünf Polarwinkel beschränkt. Daraus ergeben sich 60 Richtungen aus dem oberen Halbraum, in denen die Intensität an jedem Zelleneckpunkt bestimmt werden muss. Das Modell liefert innerhalb eines Laufes die räumliche und angulare Verteilung der Intensität für einen festen Zeitpunkt. Um die zeitliche Variabilität zu untersuchen, ist optional eine Zeitschleife eingebaut. Dies hat zur Folge, dass im Modell die meteorologischen Rahmenbedingungen über das gewünschte Zeitintervall konstant bleiben.

Der modellierte Bestand hat eine Ausdehnung von $x = 61$ m, $y = 58$ m und $z = 30,5$ m. Die untersuchte Kernfläche liegt damit mindestens 5 m von den Rändern des Modellbestandes entfernt.

Die Auswahl der räumlichen Auflösung mit einer Kantenlänge der Voxel von $l_k = 0,5$ m stellt einen idealen Kompromiss zwischen einer möglichst kleinräumigen Betrachtung des Bestandes mit hoher Genauigkeit und einer überschaubaren Rechen-
dauer des Modells dar [MIESSEN, 1994]. Die Genauigkeit der Eingangsdaten der Biomasseverteilung bildet einen weiteren für die Auflösung limitierenden Faktor.

4.4 Spektrale Erweiterung des Modells

In Kap. 4.1 wurde gezeigt, dass im Modell der differentielle Streukoeffizient $\sigma_{s,\lambda}$ eine spektrale Abhängigkeit aufweist, während der Extinktionskoeffizient σ wellenlängenunabhängig ist. $\sigma_{s,\lambda}$ beeinflusst dabei nur die einfach gestreute direkte Strahlung. Für die diffusen Komponenten der Strahlungsintensität, die im Transportprogramm berücksichtigt werden, genügt eine Betrachtung der totalen Intensitäten [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994]. Somit ist die Integration der monochromatischen Intensitäten implizit bereits durchgeführt. Die direkte Strahlung, die in den Bestand einfällt, muss dagegen einer spektralen Betrachtung unterliegen. Der PAR-Anteil der direkten Strahlung wird daher in eine Treppenfunktion von 15 Intervallen mit 20 nm Bandbreite aufgeteilt, innerhalb derer die Werte konstant sind. Die relative spektrale Verteilung von PAR oberhalb des Bestandes kann aus der PLANCK-Formel (Gleichung 6) berechnet werden. KONDRATYEV [1969] ermittelte als gute Annäherung für den PAR-Bereich eine Schwarzkörper-Temperatur von 5200 K. Neben der einfallenden PAR werden auch die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten durch Treppenfunktionen in 20 nm Intervallen ausgedrückt. Das Transportprogramm summiert nach der Berechnung der Einfachstreuung zu totalen Intensitäten auf und addiert die berechneten Werte mit den totalen Intensitäten der direkten und diffusen PAR am jeweiligen Zelleneckpunkt. In der ursprünglichen Modellfassung können als Ausgabe also nur über den PAR-Bereich integrierte Strahlungsintensitäten berechnet werden.

Eine Zielsetzung dieser Arbeit liegt in der Betrachtung spektraler Bereiche, zu denen der PAR-Bereich als bestimmende Größe für die Photosynthese zählt. Jenseits des PAR-Bereichs ist aber vor allem das R/FR von großer Bedeutung (siehe Kap. 2.2.3). Auch innerhalb der PAR sind Bereiche wie der Blaulichtanteil von großem Interesse. Die Modellierung von Strahlung in Beständen hat, wie oben gezeigt, bereits große Fortschritte gemacht. Jedoch erfolgt die Betrachtung in den meisten Fällen für den gesamten PAR-Bereich. Eine detaillierte Betrachtung nach einzelnen Wellenlängen oder Spektralbereichen auf Bestandesebene wurde nur in wenigen Fällen durchgeführt [COMBES ET AL., 2000, DE CASTRO, 2000, ANISIMOV UND FUKSHANSKY, 1997, ANISIMOV UND FUKSHANSKY, 1993, SINOQUET UND BONHOMME, 1992, LEMEUR UND ROSENBERG, 1979].

Die Leistungsfähigkeit des Modells wurde daher in dieser Arbeit um die spektrale Komponente erweitert. Die Ausgabe der Strahlungsintensitäten erfolgt nun sowohl in totalen PAR-Intensitäten als auch spektral aufgelöst in 20 nm Intervallen. Dabei kann zwischen den nach oben bzw. nach unten gerichteten Strahlungsflüssen differenziert werden. Anstelle des aus der PLANCK-Formel berechneten Spektrums werden als Eingangsspektren sowohl für die direkte als auch für die diffuse Strahlung jeweils gemessene Spektren herangezogen. Sind keine eigenen Spektren vorhanden, kann als Näherung das PLANCK-Spektrum verwendet werden.

Nach dem Gesetz von BEER-BOUGER-LAMBERT ist der Extinktionskoeffizient wellenlängenunabhängig. Die transmittierte Strahlung im Modell ist die Strahlung, die ohne Wechselwirkung durch die Phytomasse hindurchgegangen ist, also eine spektrale Zusammensetzung besitzt, die derjenigen über dem Bestand entspricht. Da im ursprünglichen Modell zu dieser Komponente die einfach gestreute direkte Strahlung addiert wird, und diese lediglich einen Bruchteil der ersteren ausmacht, haben alle berechneten Spektren annähernd die Form der Freilandspektren. Um aber eine realistische Abschätzung der spektralen Zusammensetzung im Bestand zu erhalten, muss auch die Strahlungskomponente, die mit der Biomasse wechselgewirkt hat, mit einbezogen werden, auch wenn in der Berechnung die Mehrfachstreuung vernachlässigt wurde. Zur Ermittlung der spektralen Zusammensetzung wird daher ein neues spektrales Modul, das im Folgenden beschrieben wird, in das bestehende Modell implementiert.

Das spektrale Modul wurde aus dem Modell von DE CASTRO (2000) abgeleitet. Dabei handelt es sich um ein einfaches Modell zur Simulation von vertikalen Variationen des Strahlungsspektrums in einer Baumkrone. Das Modell wurde für einen tropischen Mischwald entwickelt. Die Strahlungssumme in jeder Kronenhöhe setzt sich dabei aus den beiden Komponenten der nicht-interzeptierten und der durch die Vegetationsschicht transmittierten Strahlung zusammen. Dabei verhält sich erstere nach dem Gesetz von BEER-BOUGER-LAMBERT (Gleichung 9) und entspricht in der spektralen Zusammensetzung der Strahlung über dem Bestand. Das Spektrum der transmittierten Strahlung ist abhängig von der durchschrittenen Biomasse, die durch den Blattflächenindex beschrieben wird, und dem mittleren Transmissionspektrum der Blätter, das durch den Transmissionskoeffizienten ausgedrückt wird. Die Menge der durch die Schichtdicke u transmittierten monochromatischen Strahlung $I_{t,\lambda,u}$ berechnet sich nach der Gleichung [DE CASTRO, 2000]

$$I_{t,\lambda,u} = I_{i,u} c_{\lambda} t_{L,\lambda}, \quad (30)$$

mit dem Anteil der Wellenlänge (oder des Spektralbereiches) am gesamten Input-Spektrum über dem Bestand c_{λ} und dem Transmissionskoeffizienten der Blätter t_{λ} . Auf das in dieser Arbeit verwendete Strahlungstransportmodell übertragen bedeutet dies, dass aus der bereits berechneten nicht-interzeptierten Strahlung die Strahlung berechnet wird, die mit der Biomasse, die in Richtung der eintreffenden Strahlung zwischen dem oberen Rand des Bestandes und der zu untersuchenden Stelle liegt, wechselwirkt. Dieser Wert wird mit dem Transmissionskoeffizienten der jeweiligen

Baumart und dem relativen Anteil des Wellenlängenintervalls am gesamten Spektrum über dem Bestand multipliziert. Die berechnete Komponente wird im letzten Schritt zu den entsprechenden o.g. spektralen Strahlungskomponenten addiert. Die Qualität der Abschätzung der Strahlungsmenge und der spektralen Zusammensetzung wird in Kap. 4.5 diskutiert.

Zur Berechnung der infraroten Strahlungsintensitäten und damit zur Bestimmung des R/FR müsste die Mehrfachstreuung berücksichtigt werden. Deren Vernachlässigung ist näherungsweise nur für den PAR-Bereich zulässig, da durchschnittlich zwischen 85 % und 90 % dieses Bereichs extinguiert werden, während der nahe Infrarot-Bereich zu 85–90 % reflektiert und transmittiert wird [TANNER UND ELLER, 1985, ROSS, 1981]. Eine Erweiterung des Programmes um die Mehrfachstreuung im Infrarot-Bereich würde einen sehr großen Aufwand erfordern [GRANT ET AL., 1996]. Die Berechnung des R/FR erfolgt daher aus den gemessenen Daten. In Kap. 3.3 wurden Beziehungen zwischen $PPFR_{rel}$ und dem R/FR zu verschiedenen phänologischen Phasen festgestellt (Abb. 37–40, Tab. 8). Zur Ermittlung von $PPFR_{rel}$ wird das Verhältnis der berechneten totalen Intensitäten im Bestand mit der PPFR über dem Bestand gebildet. Aus den Werten für $PPFR_{rel}$ wird anhand der Gleichung 20 und der Parameter aus Tab. 8 für jeden Voxel ein Wert für das R/FR berechnet.

4.5 Modellvalidierung

Um die Qualität der Modellierung ermitteln zu können, müssen die berechneten Werte einer Reihe von Tests unterzogen werden. Diese Validierung wurde für die Berechnung der integralen PAR-Flüsse in Fichten-Reinbeständen bereits durchgeführt [KNYAZIKHIN ET AL., 1997, MIESSEN, 1994]. Daher sollen diese Schritte hier nicht wiederholt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zur Überprüfung der Simulation ein Vergleich mit den mittels der oben genannten Strahlungsmessanlage gemessenen Werten sowie eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Dabei müssen sowohl die quantitative Komponente als auch erstmals die spektrale Verteilung innerhalb des PAR-Bereichs überprüft werden. Zusätzlich ist es erforderlich, die berechneten R/FR mit Messdaten zu validieren.

4.5.1 Validierung anhand experimentell erhobener Daten

In Abb. 47 sind, nach Buche (Abb. 47 A) und Fichte (Abb. 47 B) unterschieden, gemessene und modellierte mittlere Vertikalprofile der $PPFR_{rel}$ dargestellt. Die Messungen wurden zur vollen Belaubung der Buche am 11.07.2005 (OVC) bzw. am 15.07.2005 (CS) zwischen 09:00 h und 15:00 h MEZ durchgeführt. Gemittelt wurde über alle der Baumart zugehörigen Sensoren der jeweiligen Ebene über die gesamte

Variante	R^2	a
Buche CS	0,78	1,21
Buche OVC	0,72	1,57
Fichte CS	0,92	0,67
Fichte OVC	0,97	0,96

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße (R^2) zwischen modellierten und gemessenen Daten und Werte der Steigungen (a) der durch den Nullpunkt gezwungenen Regressionsgeraden

Zeitspanne. Sie entsprechen den Werten aus Abb. 35. Die Modellprofile wurden über einen $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ großen Bereich innerhalb der jeweiligen Baumart gemittelt. Diese Bereiche liegen innerhalb der durch die Messseile abgedeckten Fläche. Zur Mittelung wurden sämtliche sich in den Rechtecken befindlichen berechneten Profile herangezogen. Es wurde ein Vergleich der Mittelwerte gewählt, da, wie bereits beschrieben (vgl. Kap. 3.3.2 und Abb. 35), die Variation vor allem einzelner gemessener, aber auch modellierter Profile innerhalb des betrachteten Raumes erheblich sein kann.

Bei der Betrachtung der simulierten Profile in der Buchenkrone werden die Werte der $PPFR_{rel}$ in der Baumkrone überschätzt, am Bestandesboden unterschätzt. Diese Aussage gilt für beide Bewölkungssituationen. Unter Berücksichtigung der großen Variabilitäten der Messwerte ist der Fehler der Simulation relativ gering. In Tab. 9 sind die Bestimmtheitsmaße (R^2) zwischen den modellierten und gemessenen Daten sowie die Werte der Steigungen (a) der durch den Nullpunkt gezwungenen Regressionsgeraden aufgelistet. Die Steigungen der Regressionsgeraden größer eins zeigen die Überschätzung der gemessenen Werte. Die Bestimmtheitsmaße liegen für CS- bzw. OVC-Bedingungen bei 0,78 bzw. 0,72.

Die gemessenen und simulierten Profile bei der Fichte zeigen eine bessere Übereinstimmung als bei der Buche ($R^2 = 0,92$ bei CS bzw. $0,97$ bei OVC). Unter OVC-Bedingungen liegen die Messwerte in allen Höhen sehr nah an dem modellierten Profil. Unter CS-Bedingungen wird in zwei Höhen der Krone die $PPFR_{rel}$ unterschätzt, was durch die Steigung der Regressionsgeraden von 0,67 verdeutlicht wird.

Um das eingebaute Spektralmodul zu testen, wurde ein Programm entwickelt, welches unabhängig vom Gesamtmodell Spektren über den Bereich 400 nm bis 850 nm simulieren kann. Die Berechnung ist lediglich abhängig von der durchdrungenen Blattfläche, der Weglänge und den spektralen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten. Berechnet wird nur der nach unten gerichtete Photonfluss, was den notwendigen Programmieraufwand für ein solches Programm erheblich verringert. Abb. 48 zeigt den Vergleich eines auf diese Weise simulierten Spektrums mit einem den Eingangsdaten entsprechenden gemessenen Spektrum. Die Übereinstimmung ist über den gesamten Bereich sehr gut. Im für das Modell entscheidenden Spektralabschnitt der PAR wird der Blau- und der Rotanteil etwas überschätzt, der Grünanteil leicht

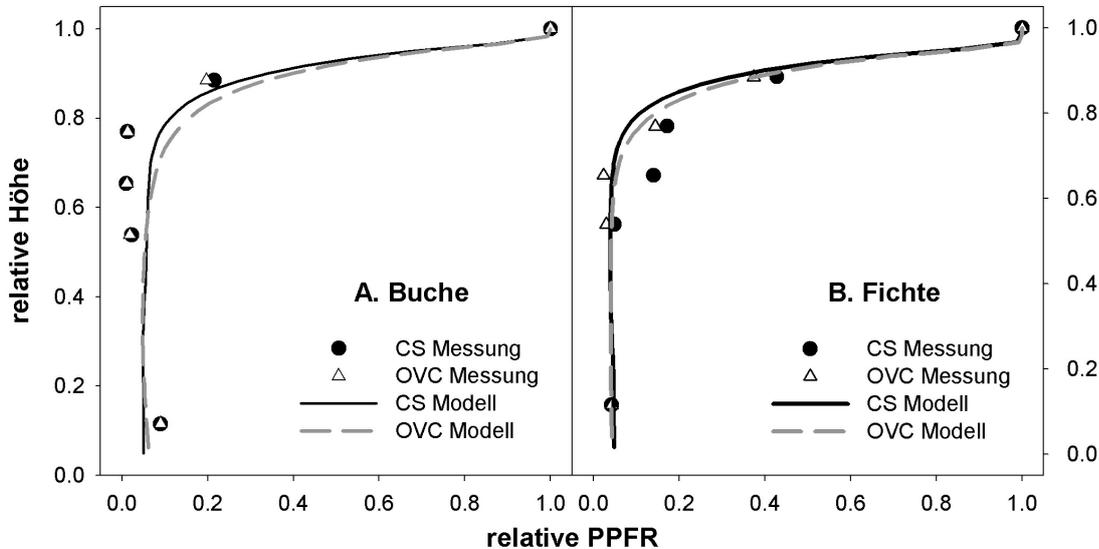


Abbildung 47: Vergleich gemessener und simulierter Vertikalprofile der relativen photosynthetischen Photonflussraten $PPFR_{rel}$. Dargestellt sind die Mittelwerte aller einer Baumart zugeordneten gemessenen Daten pro Ebene sowie die von einem 3D-Strahlungstransportmodell simulierten Profile (Mittelwerte aus 121 Profilen über 25 m^2 Grundfläche der jeweiligen Baumart) unter wolkenlosen (CS; 15.07.2005 09:00–15:00 h MEZ) und bewölkten (OVC; 11.07.2005 09:00–15:00 h MEZ) Bedingungen.

unterschätzt. Der Test zeigt deutlich, dass eine Implementierung in das komplexere dreidimensionale Modell möglich ist.

Im Folgenden soll nun der spektrale Output im PAR-Bereich des 3D-Modells validiert werden. In Abb. 49 werden hierzu die gemessenen Werte im PAR-Bereich der PFR mit den modellierten verglichen. Für einen besseren Vergleich der spektralen Verteilung innerhalb der PAR bietet sich eine Darstellung der auf einen Spektralbereich normierten Spektren an, da die Quantität der PFR beim Vergleich einzelner Spektren sehr hohen Variationen unterliegen kann und somit ein Vergleich erschwert wird. Die Normierung erfolgte auf den jeweiligen Wert des Spektralbereichs zwischen 500 nm und 520 nm . Die Spektren wurden in Ebene 5 (23 m) am 15.07.2005 unter CS-Bedingungen gemessen und modelliert. Auf eine Darstellung unter OVC-Bedingungen wurde aufgrund des identischen Verlaufs verzichtet.

Die Modellierung der spektralen Verteilung in der Buchenkrone (Abb. 49 A.) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Kleinere Abweichungen sind lediglich im Blaulichtbereich ($400\text{ nm} - 490\text{ nm}$) zu erkennen. Bei der Fichte zeigt sich eine deutlichere Überschätzung beim für Koniferen typischen niedrigen Maximum im grünen Spektralband [MITSCHERLICH, 1981]. Die restlichen Wellenlängenbereiche stimmen gut mit den gemessenen überein.

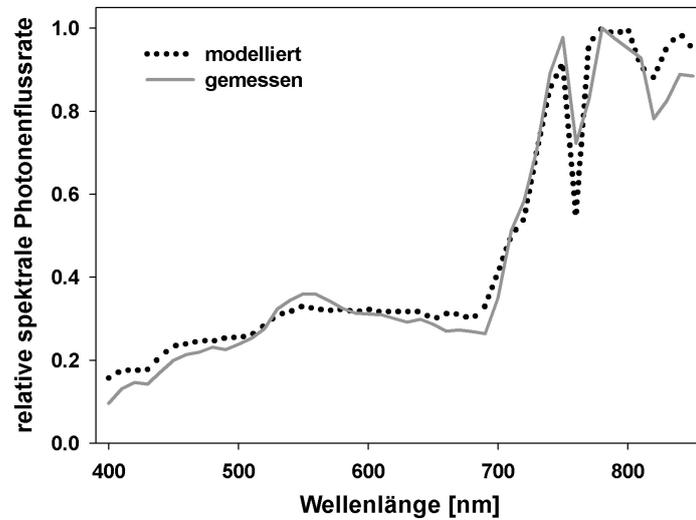


Abbildung 48: Vergleich zwischen berechnetem Spektrum nach de Castro [2000] und gemessenem Spektrum am 11.07.2005 in 20 m Höhe

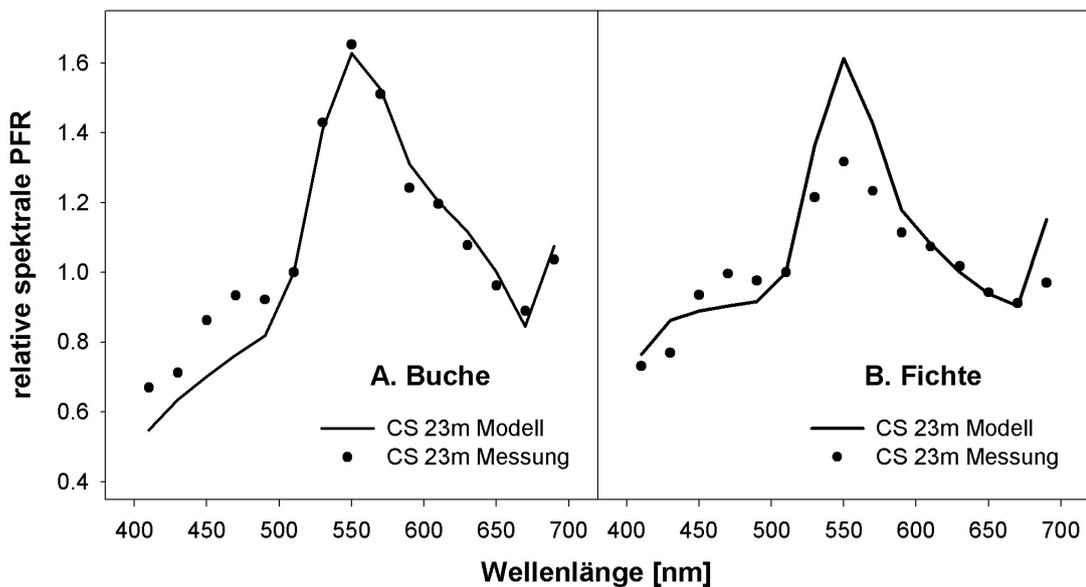


Abbildung 49: Vergleich zwischen der gemessenen und der mit einem 3D-Strahlungstransportmodell simulierten spektralen Zusammensetzung unter wolkenlosen (CS) Bedingungen am 11.07.2005 12:00 h MEZ unterschieden nach Baumart

Die Abschätzung des R/FR anhand der in Kap. 3.3.3 ermittelten Korrelationen muss ebenfalls einer Validierung unterzogen werden. Abb. 50 zeigt die am 11.07.2005 (OVC) bzw. 15.07.2005 (CS) um 12:00 h MEZ gemessenen R/FR-Werte aller Sensoren der jeweiligen Baumart im Vergleich zu den über die ausgewählten Flächen der

Baumarten berechneten Mittelwerten \pm einer Standardabweichung. Unterschieden wird nach Baumart und Bewölkungsbedingungen.

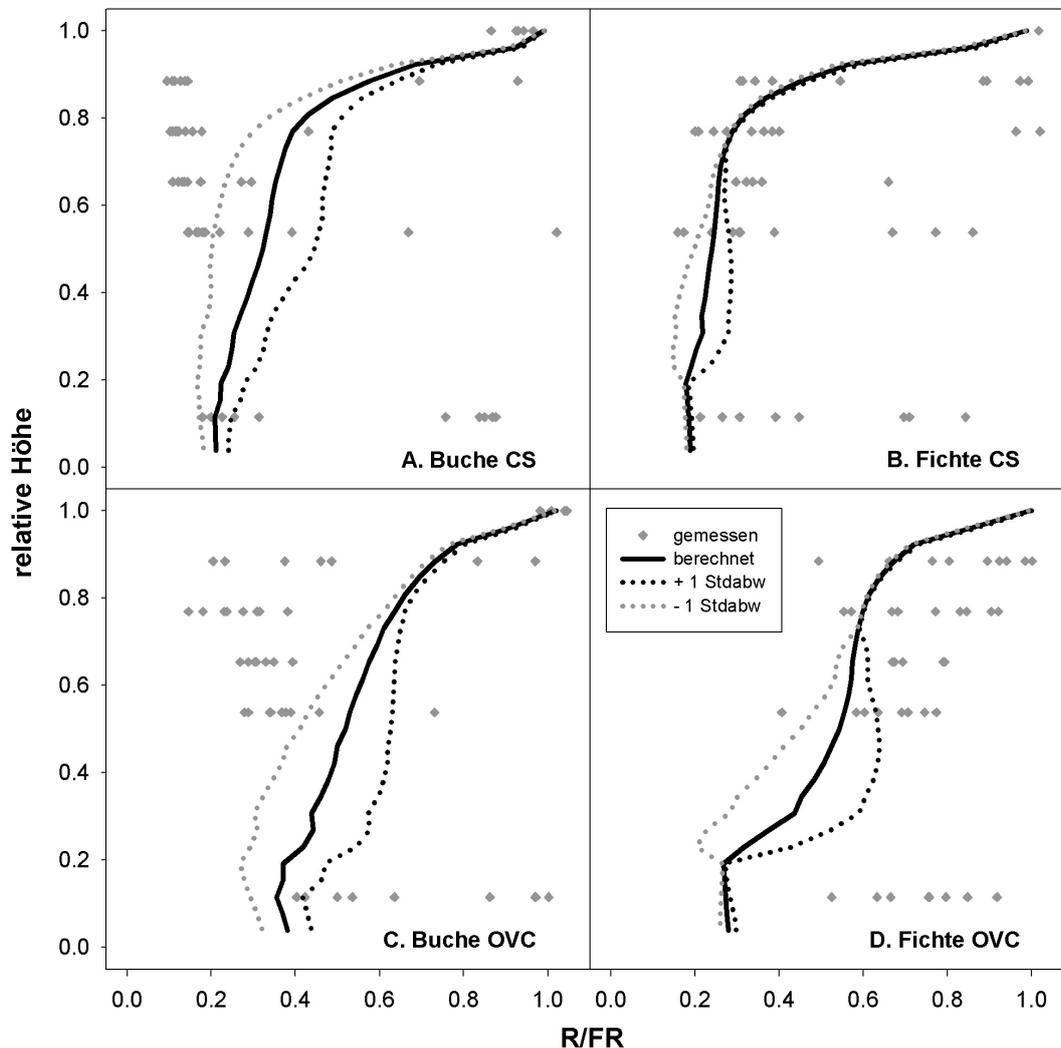


Abbildung 50: Vergleich gemessener R/FR-Werte und gemittelter modellierter R/FR-Profile unterschieden nach Baumart und Bewölkungssituation. Die gepunkteten Linien geben die Bereiche der Standardabweichung der Modellierung an.

Die größten Übereinstimmungen zwischen Messung und Modellierung sind bei der Fichte unter wolkenlosen Bedingungen gegeben (Abb. 50 B). Das simulierte Profil liegt direkt im Wertebereich der Messungen. Bei bewölkten Bedingungen wird das R/FR in der Fichtenkrone leicht unterschätzt (Abb. 50 D). Bei der Buche sind die Verhältnisse umgekehrt. Unabhängig vom Bewölkungsgrad überschätzt das Modell das spektrale Verhältnis, vor allem in der Sonnenkrone (Abb. 50 A, C). Grund hierfür sind die der Berechnung zugrundeliegenden Werte von $PPFR_{rel}$, die wie bereits erwähnt vom Modell ebenfalls leicht überschätzt werden. Aus der Art der

Abhängigkeit zwischen $PPFR_{rel}$ und R/FR (vgl. Kap. 3.3.3) ergibt sich daher, dass kleine Veränderungen in den Bereichen niedriger $PPFR_{rel}$ ($PPFR_{rel} < 0,2$) große Veränderungen im R/FR nach sich ziehen können. Am Bestandesboden werden die tatsächlichen Werte wieder besser abgebildet. Hier tritt eine leichte Unterschätzung auf.

Die hier gemessenen Profile für das R/FR unterscheiden sich teilweise deutlich von Werten für tropische Wälder, in denen das R/FR beim Durchdringen der Krone annähernd linear von 1,35 auf 0,36 abnimmt [DE CASTRO, 2000].

4.5.2 Sensitivitätsanalyse

Für die ursprüngliche Form des Modells wurde bereits eine Reihe von Sensitivitätsanalysen durchgeführt [MIESEN, 1994]. Ein Ergebnis war die Feststellung, dass ein eindimensionales Modell nicht ausreicht und damit die Notwendigkeit besteht, dreidimensional zu rechnen. Eine weitere Untersuchung wurde zur Ermittlung der optimalen Zellengröße durchgeführt. Als optimal wurde ein Würfel mit Kantenlänge 0,5 m ermittelt. Eine kleinere Kantenlänge könnte zwar das Ergebnis minimal verbessern, allerdings würde der Rechenaufwand dadurch erheblich gesteigert werden. In der momentanen Form des Modells umfasst der modellierte Bestand 834900 Zellen. Eine Halbierung der Kantenlänge hätte eine Verachtfachung der Zellen zur Folge. Eine dritte Analyse erfolgte für die Überprüfung der Wellenlängenabhängigkeit der optischen Eigenschaften, also des Reflexions- und Transmissionkoeffizienten der Phytomasse. Sie ergab, dass die optischen Eigenschaften durch wellenlängenabhängige Funktionen repräsentiert werden müssen [MIESEN, 1994], also eine Mittelung über den gesamten Spektralbereich nicht ausreicht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ergänzender Analysen mitgeteilt, die vor allem Veränderungen von Input-Parametern untersuchen. Insbesondere werden die eingehenden Blattflächendichtewerte und der konstant gesetzte Wert der Bodenreflexion verändert. Des Weiteren wird die Anzahl der Polar- und Azimutwinkel verringert bzw. erhöht.

Die Untersuchung ergab, dass die Bodenreflexion keinen großen Einfluss auf die berechnete PPFR hat. Eine deutliche Erhöhung des Bodenreflexionswerts um das Fünffache von 0,07 auf 0,35 hat eine maximale Erhöhung der PPFR in 0,5 m über dem Boden von weniger als 3% zur Folge, in der Krone sind keine Auswirkungen erkennbar. Veränderungen der Anzahl der verwendeten Polar- und Azimutwinkel zeigen ebenfalls keine großen Effekte auf das Modellergebnis. Weder eine Reduktion noch eine Erhöhung der Anzahl der Polarwinkel von fünf auf drei bzw. sieben und der Azimutwinkel von 60 auf 24 bzw. 112 hatten eine Veränderung der PPFR von mehr als 1% zur Folge.

Eine Veränderung der Blattnormalenorientierung der Buche von einem planophilen Ansatz auf eine sphärische Verteilung hat Unterschiede von kleiner 1% zur Folge, spielt also ebenfalls eine eher untergeordnete Rolle.

Ein Parameter, dessen Veränderung die Modellergebnisse stärker beeinflusst, ist die Blattflächendichte. In Abb. 51 ist die Veränderung der $PPFR_{rel}$ -Profile auf eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Blattflächendichtewerte dargestellt. Sowohl bei der Buche als auch bei der Fichte sind deutliche Abweichungen festzustellen. Im Vergleich der Untersuchungen der einzelnen Parameter reagiert diese Eingangsgröße am sensitivsten. Jedoch umfasst eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Blattflächendichte eine sehr große Spannweite, die deutlich größer als der zu erwartende Fehler bei der Eingangsvariable ist.

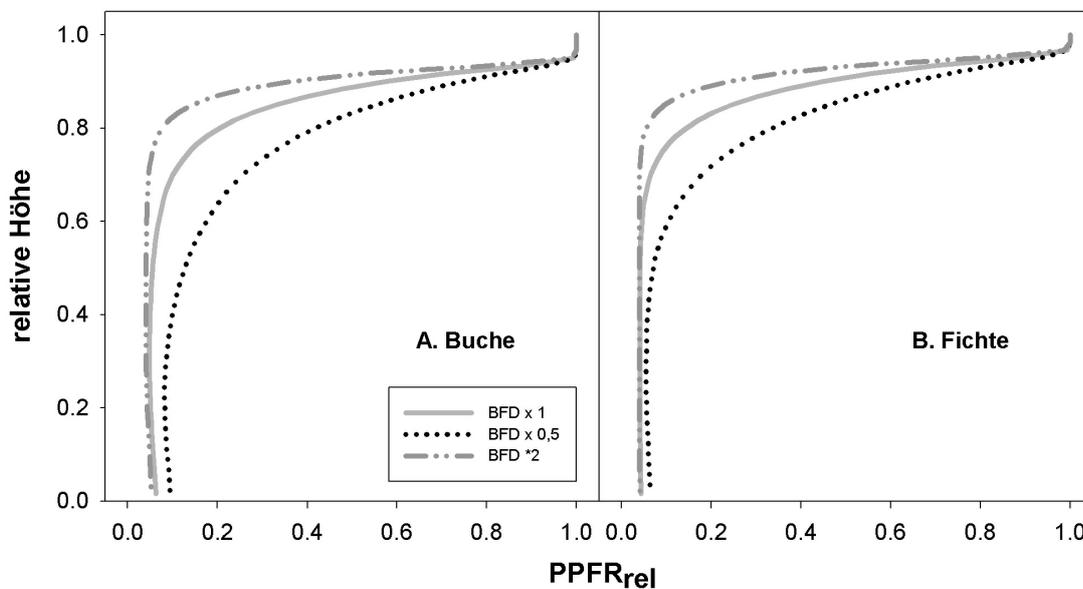


Abbildung 51: Modellerte Strahlungsverikalprofile unter veränderten (Verdopplung bzw. Halbierung) Eingangswerten der Blattflächendichte (BFD)

4.6 Ergebnisse und Diskussion der Modellierung

Exemplarisch werden Ergebnisse der Modellierung an einem wolkenlosen Tag (15.07.2005 12:00 MEZ) und an einem komplett bewölkten Tag (11.07.2005 12:00 MEZ) dargestellt. Nachdem bei der Validierung in Kap. 4.5.1 bereits typische Vertikalprofile für den PAR-Bereich und das R/FR dargestellt wurden, soll darauf in diesem Abschnitt verzichtet werden. In den Abb. 52–59 sind Querschnitte des gesamten Bestandes abgebildet, die für die Höhen 14 m und 20 m repräsentativ sind. Die Ursprungskoordinate (0/0) in den Modellprofilen entspricht der Koordinate (992,2/962,7) im Grundriss der Messfläche (Abb. 18). Abb. 60 stellt die modellierte

spektrale Zusammensetzung im PAR-Bereich für Buche und Fichte in verschiedenen Höhen im Bestand dar.

4.6.1 Verteilung der photosynthetisch aktiven Strahlung

Abb. 52 zeigt die horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem wolkenlosen Tag. Die Ellipsen zeigen jeweils einen Bereich einer Buchengruppe, einer Fichtengruppe und einer Lichtung. Es ist deutlich zu erkennen, dass in die Lichtung bis zu 80 % der über dem Bestand eintreffenden PPFR eindringen kann, während die Baumkronen der Buchen und etwas stärker noch der Fichten fast die gesamte PPFR extingieren. Die kleinräumige Variabilität der Strahlungsverteilung innerhalb des Bestandes, die durch das Modell wiedergegeben wird, deutet sich insbesondere in der Buchenzone durch zahlreiche kleinere Spitzen, die Lichtflecken repräsentieren, an. Ein ähnliches Bild zeigt sich in 14 m Höhe auch bei bewölkten Bedingungen (Abb. 53). Die vereinzelt Spitzen in der Strahlungsverteilung sind jedoch nicht so stark ausgeprägt, da bei ausschließlich diffuser Strahlung Lichtflecken weniger zur Geltung kommen als bei CS-Bedingungen. Der Bereich der Lichtung liegt ebenfalls auf niedrigerem Niveau, während im Kronenschatten die $PPFR_{rel}$ etwas höher liegt als im wolkenlosen Fall.

Die modellierte horizontale Strahlungsverteilung innerhalb der Schattenkrone in 20 m Höhe ist in den Abb. 54 und 55 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den beiden Bewölkungssituationen sind identisch mit den Beobachtungen unterhalb der Kronenschicht. Insgesamt sind die Strahlungswerte in beiden Fällen höher, insbesondere im Bereich der Buche.

In Kap. 4.5.1 wurde beschrieben, dass die Werte für die Buche von dem Modell überschätzt werden. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass das Modell zu einem gewissen Grad sensitiv gegenüber Variationen der Blattflächendichte ist. Neue Erhebungen der Biomasseverteilung werden zeigen, ob ein veränderter Eingangsdatensatz eine Verbesserung der Abschätzung ermöglicht. Eine weitere Fehlerquelle liegt möglicherweise in den herangezogenen Daten der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten für die Buche. Die Daten wurden aus der Literatur übernommen [TANNER UND ELLER, 1985]. Eine Bestimmung dieser Parameter auf der Versuchsfläche kann zu einer verbesserten Abschätzung führen.

Das eingebaute spektrale Modul sorgt für eine zusätzliche Erhöhung der berechneten Strahlungswerte, allerdings auf relativ niedrigem Niveau, so dass diesem Aspekt nur eine untergeordnete Rolle zugewiesen werden kann. Für die Abschätzung im Kronenraum der Fichte hat diese Komponente keine negativen Auswirkungen auf das Modellergebnis.

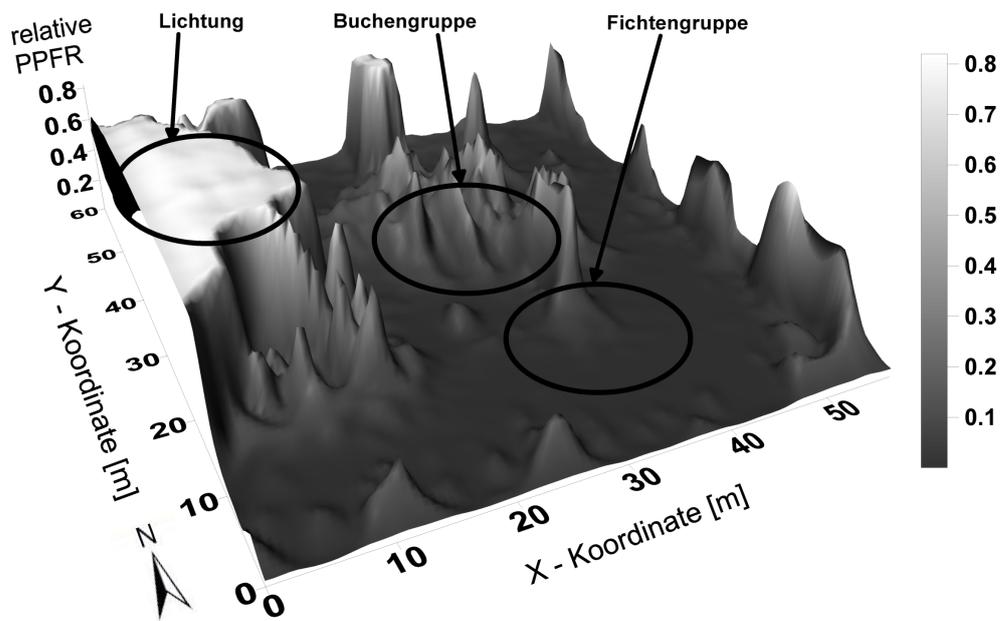


Abbildung 52: Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

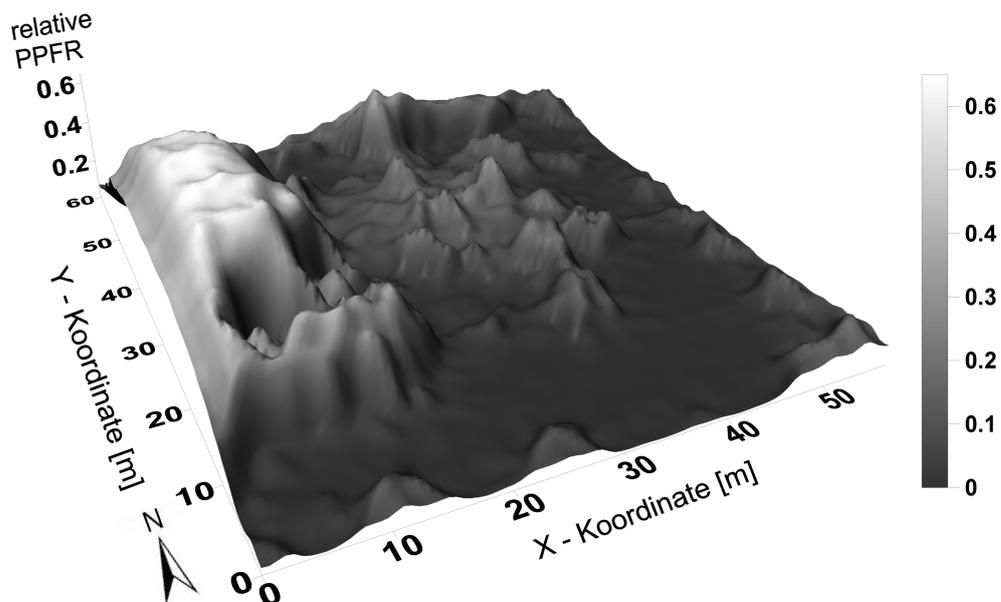


Abbildung 53: Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

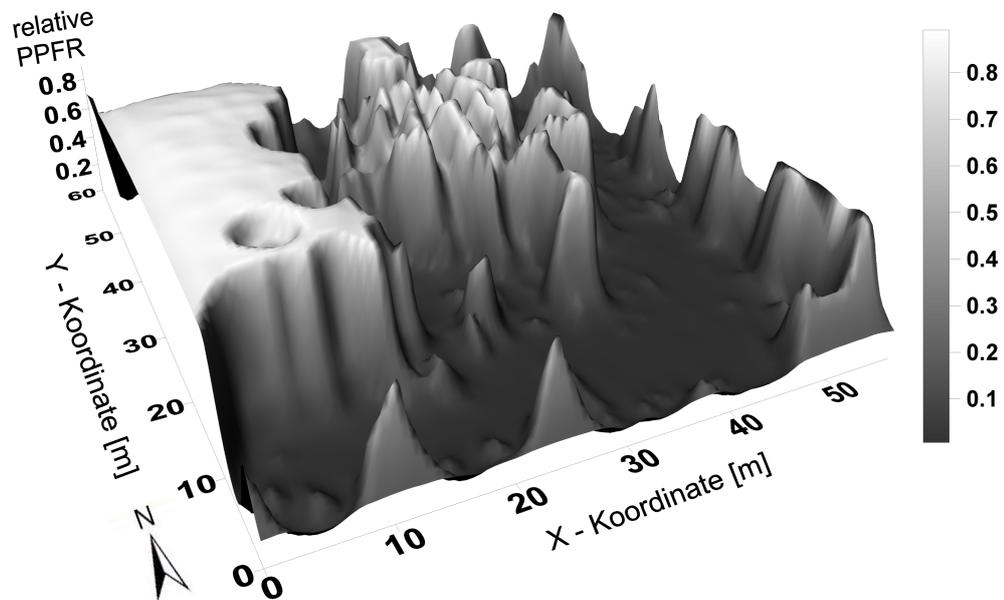


Abbildung 54: Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

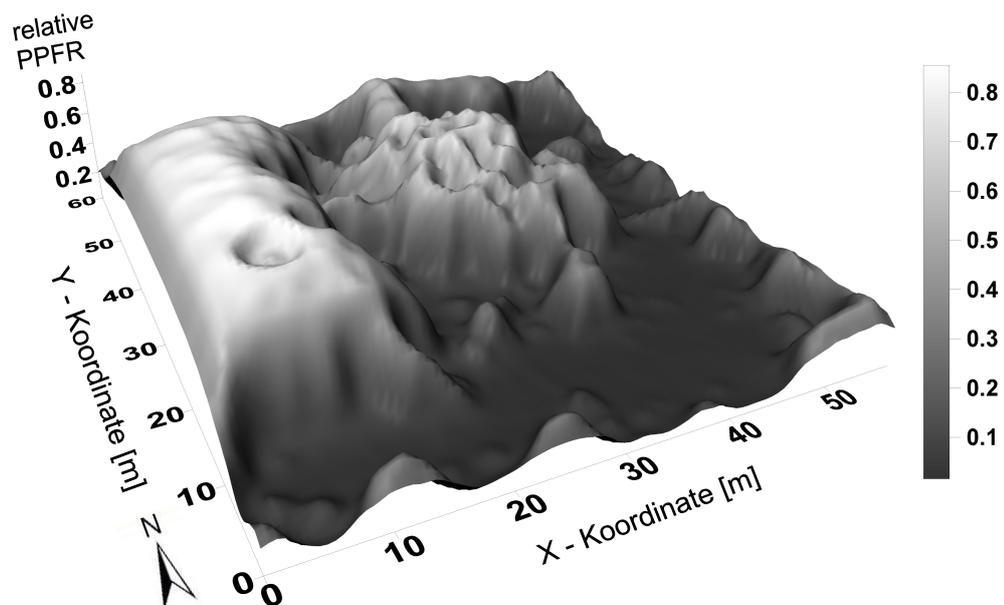


Abbildung 55: Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

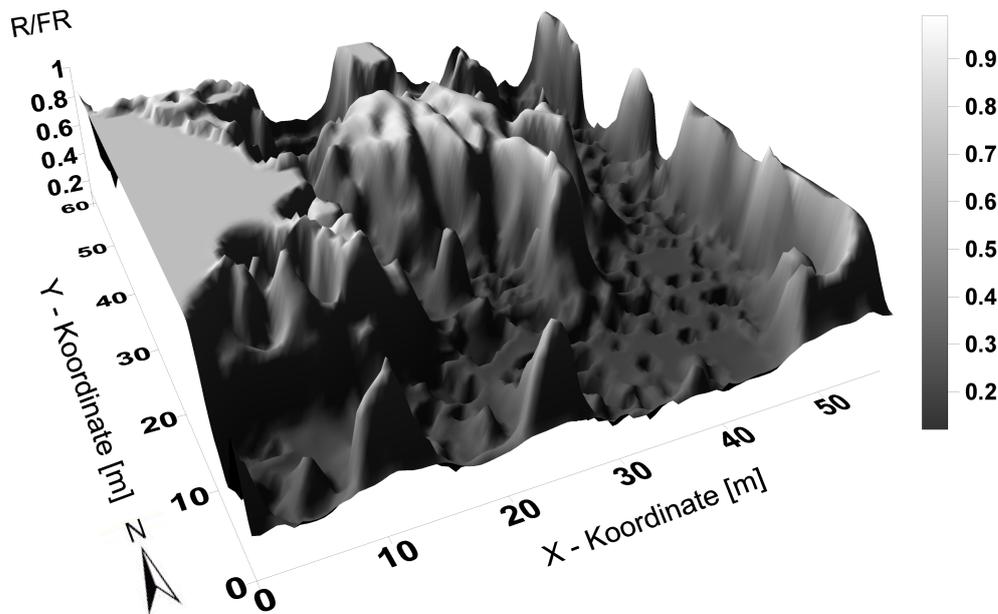


Abbildung 56: Modellerte horizontale Verteilung des R/FR direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

4.6.2 Verteilung der photomorphogenetisch aktiven Strahlung

Als Repräsentant für die photomorphogenetische Strahlung, die sich von 350 nm – 800 nm erstreckt, soll das Spektralverhältnis R/FR herangezogen werden. Das R/FR verhält sich in seiner Verteilung im Bestandesquerschnitt inhomogener als die PPFR. Die Abb. 56–59 zeigen diese berechneten Verteilungen für die beiden Bewölkungssituationen in den gleichen Höhen wie für die PPFR. Werte in der Größenordnung der eintreffenden Strahlung über dem Bestand sind in allen Fällen im Bereich der Lichtung zu finden. In 20 m Höhe nimmt ein Teil der Buchenzone ebenfalls diese hohen Werte an (Abb. 58 und 59). Der andere Teil der Buchen- sowie der größte Teil der Fichtenzone weist niedrige R/FR-Werte auf, die in der Krone höher liegen als unmittelbar unterhalb der Krone (Abb. 56 und 57). Unter CS-Bedingungen ist das Spektralverhältnis im Kronenschatten stärker reduziert als unter OVC-Bedingungen. Die relativ hohen Werte in Bereichen der Buchenkrone sind durch die Überschätzung durch das Modell erklärbar und liegen tatsächlich im Bestand niedriger.

Die Überschätzung der Werte des R/FR durch das Modell vor allem im Kronenbereich der Buche lässt sich durch die Überschätzung der PPFR erklären (vgl. Kap. 4.5.1 und 4.6.1). Der Zusammenhang zwischen der $PPFR_{rel}$ und dem R/FR wurde in Kap. 3.3.3 quantifiziert. Die Abhängigkeit wird durch eine rechtwinklige Hyperbel gut beschrieben. Gerade bei niedrigen Strahlungsniveaus ($PPFR_{rel} < 0,2$) ist diese Kurve sehr steil, d.h. geringe Veränderungen der $PPFR_{rel}$ können große Variationen des R/FR nach sich ziehen.

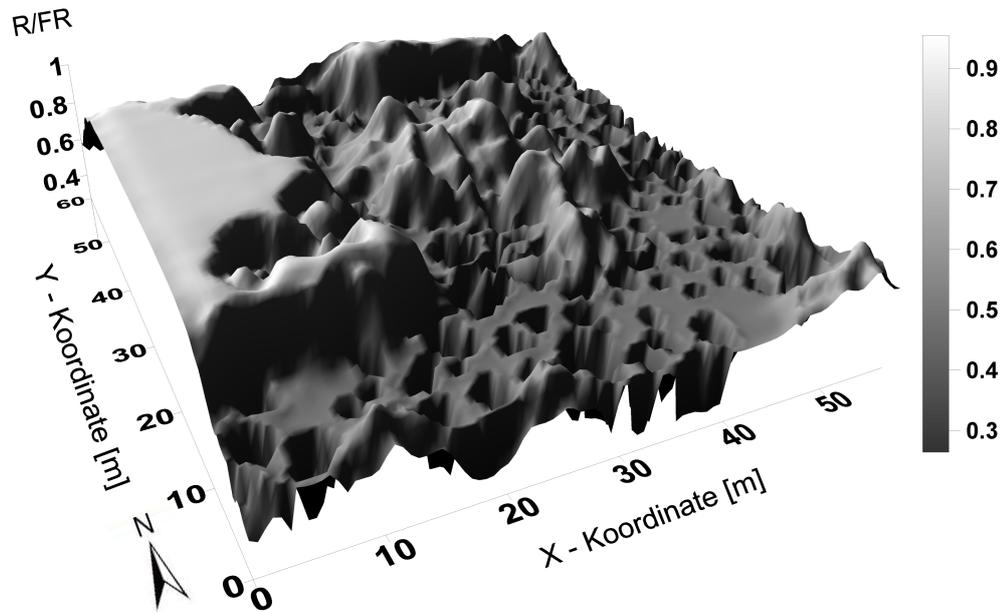


Abbildung 57: Modellierter horizontale Verteilung des R/FR direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

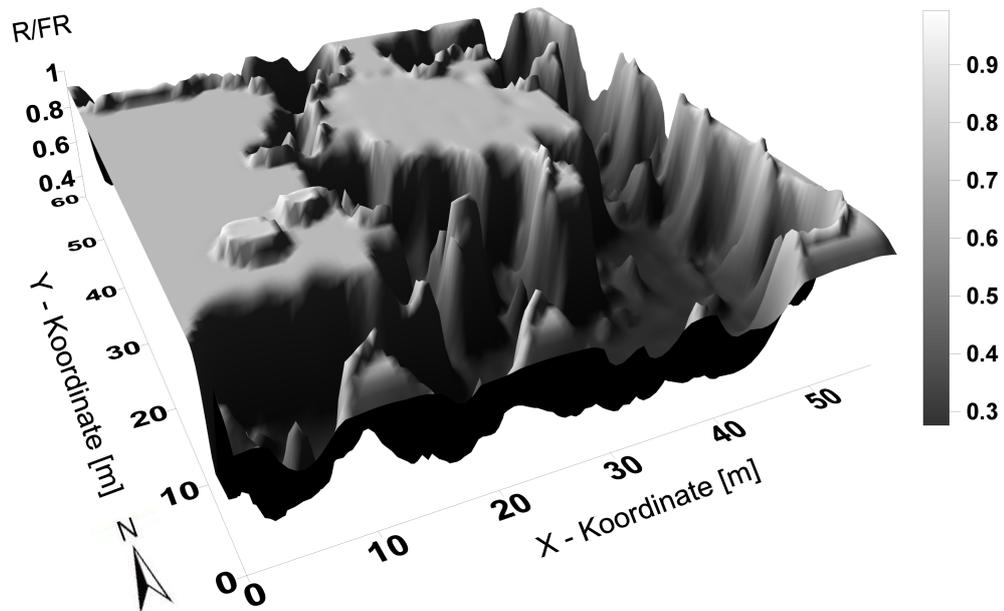


Abbildung 58: Modellierter horizontale Verteilung des R/FR in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

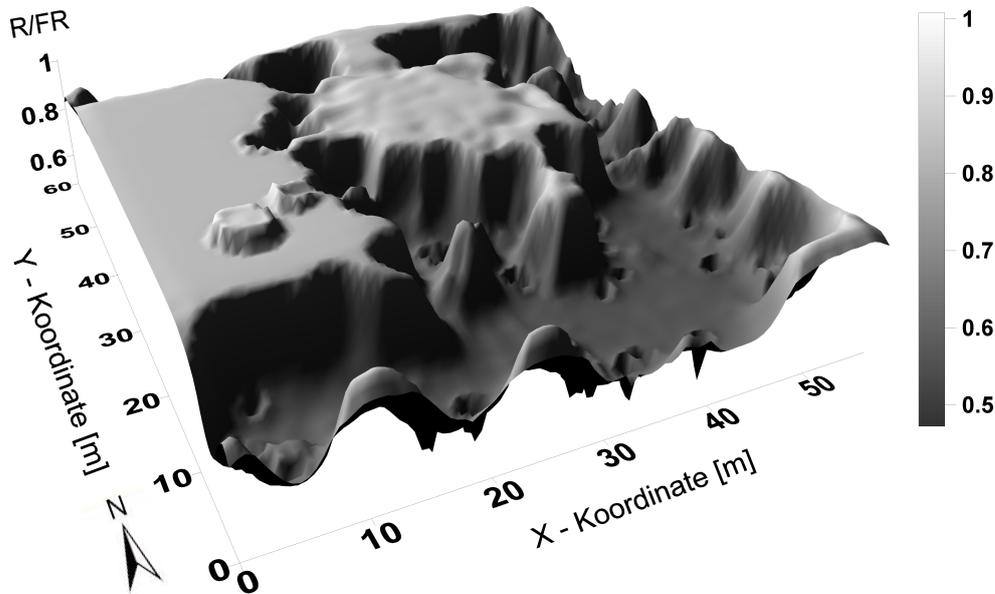


Abbildung 59: Modellierte horizontale Verteilung des R/FR in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)

Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Strahlungsverteilung ist es schwer, für einzelne Zeitpunkte kleinräumig präzise Vorhersagen zu treffen. Hierfür eignet sich eine Mittelung über längere Zeitintervalle bzw. über größere Flächen, um den Einfluss kurzzeitiger und kleinräumiger Effekte wie Lichtflecken zu minimieren. Diese Aussage gilt sowohl für die Abschätzung der photomorphogenetisch als auch der photosynthetisch aktiven Strahlungskomponente.

4.6.3 Vertikale Veränderung der spektralen Zusammensetzung

Das Modell gibt für jeden integralen Wert der PPFR bzw. jeden Wert von $PPFR_{rel}$ jeweils die spektrale Verteilung in einer Treppenfunktion wieder. Diese besteht aus 15 Bereichen mit 20 nm Bandbreite. In Abb. 60 ist die spektrale Verteilung über den PAR-Bereich für je ein Buchen- und Fichtenprofil sowohl in absoluten als auch in relativen Werten dargestellt. Es handelt sich dabei um zufällig ausgewählte Profile innerhalb des Bereichs der jeweiligen Baumart unter CS-Bedingungen am 15.07.2005 um 12:00 h MEZ.

Die Quantität der PFR nimmt bei zunehmender Durchdringung der Krone rapide ab (Abb. 60 A, C). Die dargestellten relativen Höhen zwischen 0,67 und 0,10 weisen bei dieser Skalierung jedoch kaum Unterschiede in der Quantität, aber auch in der Qualität auf. Die unterschiedliche Strahlungsqualität wird durch die Darstellung der relativen PFR verdeutlicht (Abb. 60 B, D). Auch hier sind die Unterschiede nur in den oberen Bereichen der Krone festzustellen. In den relativen Höhen unter

0,67 sind sie minimal (vgl. Abb. 23). Wie bereits durch die Messungen aufgezeigt wurde, absorbiert die Baumkrone verstärkt die blauen (400 nm–490 nm) und roten (610 nm–700 nm) Anteile der Strahlung, was auf die Absorptionsspektren der Blattpigmente, insbesondere Chlorophylle und Carotinoide, zurückzuführen ist.

Die Beobachtungen gelten sowohl für Buche als auch für Fichte. Es wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich fünf Spektren abgebildet. Das Modell liefert pro Vertikalprofil 60 Spektren und insgesamt 13915 Vertikalprofile pro Lauf.

Die Validierung hat gezeigt, dass die spektrale Zusammensetzung für die Buche etwas besser abgeschätzt werden kann. In den beschriebenen Profilen sind jedoch keine großen Unterschiede zwischen den beiden Baumarten erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass bei der Fichte der Grünbereich und bei der Buche der Blaubereich etwas über- bzw. unterschätzt wird.

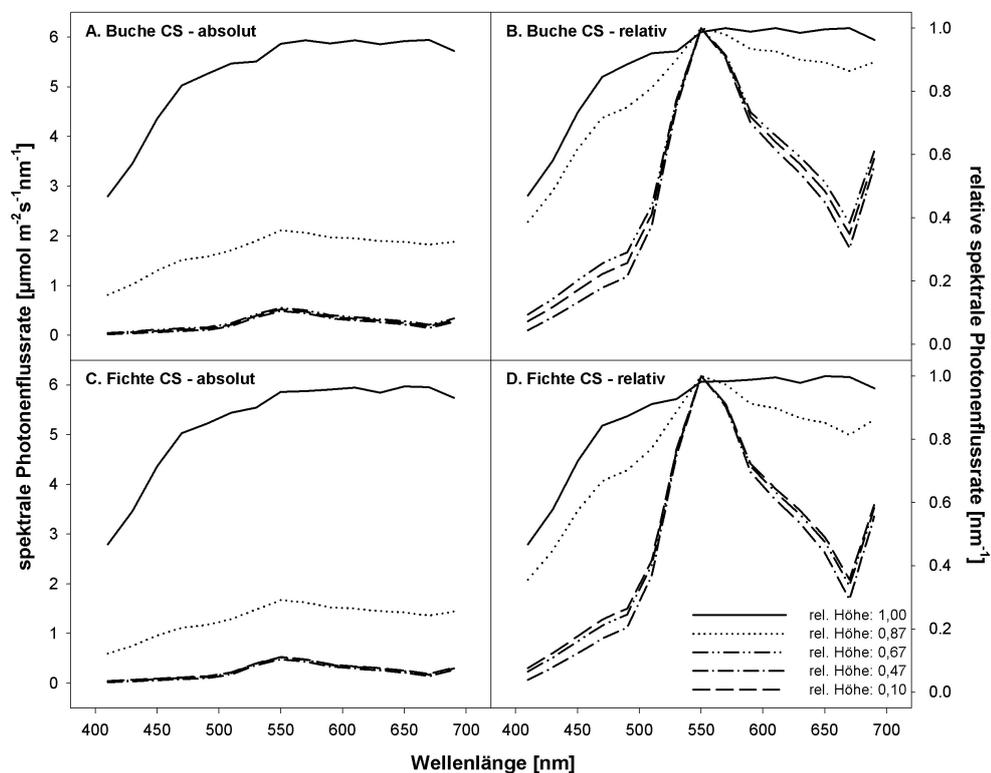


Abbildung 60: Modellierter spektraler PFR und spektraler PFR_{rel} für den PAR-Bereich in unterschiedlichen Höhen der Buchen- und Fichtenkrone unter CS-Bedingungen

Im Modell kann optional ein Modul zur Berechnung der Nettophotosyntheserate in der Baumkrone eingeschaltet werden [MIESSEN, 1994], was jedoch für diese Arbeit nicht zielführend ist und deshalb weggelassen wurde. Allerdings kann das Modell in zukünftigen Untersuchungen einen wichtigen Beitrag zur Bestimmung der Photosyntheseleistung in Mischbeständen leisten.

5 Diskussion

Ein Teil der Diskussion wurde im Zusammenhang mit den Erläuterungen der Mess- und Modellergebnisse in den Kap. 3.3 und 4.6 bereits durchgeführt. Dies soll zum besseren Verständnis der dort aufgeworfenen Aspekte dienen. Der nachfolgende Teil der Diskussion soll sich nun mit übergeordneten Problemen, unbeantworteten Fragen und notwendigem Forschungsbedarf auseinandersetzen.

Die Bestimmung des Strahlungsklimas in Pflanzenbeständen findet Anwendung auf verschiedensten Gebieten [MIESSEN, 1994]. Wachstumsmodelle von Wäldern benötigen Informationen über die Photosyntheserate von Baumindividuen bis hin zu ganzen Beständen, die primär durch die Verteilung der Strahlung gegeben ist. Kenntnis über Strahlungsaustauschprozesse zwischen oberflächenbedeckenden Waldgebieten und der Atmosphäre dient als wichtige Randbedingung für Klimamodelle. In der Fernerkundung von vegetationsbedeckten Oberflächen werden Informationen über spektral aufgelöste Strahlungsreflexion und -emission von Wäldern sowie der Bestandesarchitektur benötigt. Gerade durch die waldbauliche Praxis der Einbringung von Buchen in Fichten-Reinbestände aus Gründen der Diversifizierung von Monokulturen und dem damit verbundenen gesteigerten Schutz gegenüber Klimaveränderungen ist es wichtig, das Strahlungsregime in Mischbeständen zu untersuchen [AMMER, 2000].

PAR-Strahlungsdaten von 20 Intensivmessästen im Kranzberger Forst [LEUCHNER ET AL., 2003] dienten als Eingangsdaten für die Ozon-Flux-Modellierung [NUNN ET AL., 2005, NUNN, 2004]. REITER [2004] benutzte einen weiteren Datensatz der Intensivmessäste [REITMAYER ET AL., 2002] für Abschätzungen von Raumbesetzungsprozessen, Kohlenstoffbilanzierung und weiteren physiologischen Parametern unter verschiedenen Strahlungsniveaus in der Sonnen- und Schattenkrone von Fichte und Buche.

Aus diesem Ausschnitt der Anwendungsmöglichkeiten lässt sich die Bedeutung der Ressource Strahlung erkennen. Allerdings ist, wie diese Studie zeigt, die quantitative und qualitative Erfassung dieser in Raum und Zeit hochvariablen Größe und ihre Darstellung in Modellen ein sehr komplexes und aufwendiges Vorhaben.

Ein wichtiger Punkt dabei ist die Art der Strahlungsmessung. Je nach Aufgabengebiet müssen differenzierte Versuchsanordnungen und verschiedenartige Sensoren mit unterschiedlichen spektralen Charakteristika und Formen angewandt werden. Zur optimalen Bestimmung des Strahlungsangebotes in Ökosystemen, vor allem aber in pflanzenrelevanten Studien, sollte die Photonenflussrate anstelle der häufig verwendeten Photonenflussdichte bestimmt werden, also der Photonenfluss, der aus allen Raumrichtungen an die Rezeptoroberfläche gelangt. Dieser gibt die tatsächlich von der Pflanze empfangene Strahlungsquantität und -qualität besser wieder [BJÖRN UND VOGELMANN, 1996, SMITH, 1982, HARTMANN, 1978, KUBÍN, 1971].

In der vorliegenden Untersuchung wurde der deutliche quantitative Unterschied dieser beiden Messmethoden aufgezeigt, der je nach Sonnenstand und der damit vermehrt seitlich einfallenden Strahlung einen Faktor von annähernd sechs einnehmen kann. Neben den Differenzen in der Intensität ist mit variierender Einstrahlungsrichtung auch ein Unterschied in der spektralen Zusammensetzung zu beobachten [VARLET-GRANCHER ET AL., 1993]. Die Bedeutung für o.g. Berechnungen von Photosyntheseleistung, Raumbesetzungsmustern, Stoffaufnahme- und Kohlenstoffbilanzierung liegt bei derartigen Unterschieden auf der Hand. In Zukunft werden Vergleichsberechnungen Aufschluss über den tatsächlichen Unterschied in der Berechnung von photosynthetischen Größen auf Bestandesebene, aber auch auf kleinräumiger Ebene geben können. Hierfür werden die in dieser Arbeit erhobenen Daten und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse einen wichtigen Beitrag leisten können.

Gerade die Bedeutung niedriger Sonnenstände zu Beginn und Ende des Tages sowie gegen Ende der Vegetationsperiode und der damit verbundenen spektralen Veränderung der Strahlung für die Photomorphogenese wirft noch viele Fragen auf und ist gerade unter Freilandbedingungen noch nicht besonders detailliert untersucht. Die meisten Untersuchungen bezüglich der Auswirkung spezieller Spektralbereiche auf die Photomorphogenese wurden im Labor oder mit Sämlingen durchgeführt [siehe u.a. TEGELBERG ET AL., 2004, AMMER, 2003, DE CHANTAL ET AL., 2003, MUTH UND BAZZAZ, 2002, RITCHIE, 1997, VARLET-GRANCHER ET AL., 1993]. Es gibt jedoch kaum experimentelle Studien in Bezug auf Wachstums- und Konkurrenzverhalten von älteren Beständen unter Berücksichtigung des raumintegrierenden spektralen Strahlungsflusses [REITER, 2004]. Auch hierzu dienen die Mess- und Modellergebnisse dieser Untersuchung, die in einem nächsten Schritt mit Raumbesetzungs- und Photosynthesedaten verknüpft werden.

Die Konstruktion von geeigneten Sensoren zur Messung der pflanzenrelevanten Strahlung ist zeit- und kostenintensiv und bei vielen Anwendungen nicht erforderlich bzw. nicht zielführend. Aus diesem Grund schlägt BJÖRN [1995] eine einfache Methode zur Bestimmung der Photonflussrate aus herkömmlichen Planarsensoren vor, die eine gute Abschätzung dieser Strahlung mit handelsüblichen Sensoren und geringem Aufwand ermöglicht. Allerdings ist diese Abschätzung nur sinnvoll bei Aufgabenstellungen, die eine niedrige zeitliche und räumliche Auflösung erfordern und über den gesamten PAR-Bereich integriert arbeiten. In jedem Fall liefert eine derartige Messung bessere Werte der tatsächlich von der Vegetation empfangenen Strahlung als rein planare Messmethoden.

Saisonale Veränderungen der Strahlungsflüsse in Wäldern wurden in zahlreichen Studien im Rahmen von Strahlungsbilanzierungen, aber vor allem für den PAR-Bereich beschrieben [GENDRON ET AL., 1998, CONSTABEL UND LIEFFERS, 1996, BALDOCCHI ET AL., 1986, 1984b, REIFSNYDER ET AL., 1971]. Bei letzteren wurde in den meisten Fällen die integrale PAR-Strahlung erfasst. Statistische Abschätzungen des Auftretens gewisser Strahlungsniveaus sowie Lichtfleck- und Halbschattenstatistiken wurden durchgeführt [PALVA ET AL., 2001, 1998b, PALMROTH ET AL., 1999,

GRANT, 1997, BALDOCCHI ET AL., 1986, OKER-BLOM, 1985]. Saisonale Veränderungen durch wechselnde Sonnenhöhen und sich verändernde Vegetationszustände sind in vielen Regionen untersucht worden. Die in LEUCHNER ET AL. [2005] beschriebenen und in dieser Arbeit (Kap. 3.3) erweiterten Ergebnisse des Strahlungsklimas in Mischbeständen zu unterschiedlichen phänologischen Phasen stimmen weitestgehend mit den Werten aus der Literatur [BALDOCCHI ET AL., 1986, MITSCHERLICH, 1981] überein.

Generell lässt sich aus den hier gewonnenen Ergebnissen der Strahlungsverteilung im Fichten-Buchen-Mischbestand feststellen, dass bei voller Belaubung in der Buchenkrone mehr Strahlung den Bestandesboden erreicht als bei der immergrünen Fichte. Im Kronenraum kehrt sich diese Beobachtung um und es finden sich durchschnittlich höhere Strahlungsflüsse in der Fichten- als in der Buchenkrone, was sich auf die unterschiedlichen Wuchsformen der beiden Baumarten zurückführen lässt. Die Fichte erlaubt es der Strahlung aufgrund ihrer konischen Wuchsform vor allem in oberen Kronenregionen vermehrt einzudringen, während die Buche gerade in den ersten Metern ein sehr geschlossenes Kronendach aufweist und den Großteil der Strahlung extinguiert. Ohne Belaubung können im Vergleich zu den Fichten erwartungsgemäß höhere Strahlungsniveaus in allen Höhen der Buchenkrone beobachtet werden.

Ein Vergleich zwischen Literaturwerten und den hier gemessenen Werten ist jedoch nur sehr eingeschränkt möglich, da sich unter anderem die bereits erwähnten Unterschiede in der Messmethode (sphärisch gegenüber planar) und der deutlich höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung auf Bestandesebene ergeben. Durch Unterschiede in der Biomasse beispielsweise durch Artenzusammensetzung, Alter, Höhe und Dichte des Bestandes ergeben sich weitere Unsicherheitsfaktoren, die einen Vergleich erschweren. WIRTH ET AL. [2001] untersuchten für einen tropischen Mischwald die Strahlungstransmission in Abhängigkeit der Kronenstruktur und stellten fest, dass bereits geringe saisonale Variabilitäten in der Blattflächendichte und Unterschiede in der Artenzusammensetzung deutliche Auswirkungen auf das Strahlungsangebot bis hin zu einer Verdoppelung aufweisen können. Dies erklärt unter anderem die deutlich höheren Werte der Kronentransmission über die gesamte Vegetationsperiode in einem Espen-Weißfichten-Altbestand [CONSTABEL UND LIEFFERS, 1996] sowie in einem Kiefern-Bestand [GHOLZ ET AL., 1991] im Vergleich zu dem hier untersuchten.

Trotz zahlreicher Untersuchungen über die Relevanz spektraler Verhältnisse für das Pflanzenwachstum [AMMER, 2003, REITMAYER ET AL., 2002, SMITH, 2000, GRANT, 1997] werden diese in Konkurrenzstudien und Wachstumsmodellen häufig vernachlässigt. Diese Arbeit hat gezeigt, dass es möglich ist, das morphogenetisch wichtige Hellrot-Dunkelrot-Verhältnis (R/FR) aus quantitativen, integralen Werten der PAR-Strahlung unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen gut abzuschätzen und in ein dreidimensionales Strahlungstransportmodell zu implementieren. Von CAPERS UND CHAZDON [2004] wurde eine Methode zur raschen Bestimmung des Lichtklimas, insbesondere des R/FR unterhalb der Krone, aus einfachen Messungen

der PAR-Strahlung entwickelt. Die sehr hohe Abhängigkeit zwischen dem Anteil der PAR-Transmission und dem R/FR, die für einen tropischen Regenwald gefunden wurde, können durch diese Arbeit nicht in vollem Umfang bestätigt werden. Allerdings unterscheiden sich die beiden Untersuchungen unter anderem durch die Zusammensetzung der Vegetation und die Sensorform, auf deren Bedeutung bereits hingewiesen wurde. Große Gemeinsamkeiten dieser Arbeit mit der Studie von CAPERS UND CHAZDON [2004], die durch weitere Studien belegt werden [MURAOKA ET AL., 2001, OLESEN, 1992, LEE, 1989, 1987], bestehen im quantitativen Zusammenhang zwischen der photosynthetisch und der photomorphogenetisch aktiven Strahlung sowie in Form der Abhängigkeit der beiden Parameter, die durch eine hyperbolische Sättigungsfunktion charakterisiert werden kann. In dieser Arbeit wurde erstmals dieser Zusammenhang mit einer sehr hohen Anzahl von Stichproben in verschiedenen Ebenen eines Bestandes ermittelt und eine Unterscheidung nach phänologischem Entwicklungsstadium, Zusammensetzung der Baumarten, Sonnenstand, meteorologischen und geographischen Rahmenbedingungen durchgeführt.

Die Wertebereiche der gemessenen R/FR stimmen mit Werten aus der Literatur überein (Kap. 3.3.2), ein Vergleich ist jedoch aus den gleichen Gründen wie beim PAR-Bereich nur bedingt möglich. Die im Kranzberger Forst gemessene Spanne des R/FR liegt zwischen 0,06 bei Buche und voller Belaubung und 1,20 bei Fichte nach Laubfall der Buche. Wie in dieser Arbeit beobachtet, liegen die R/FR-Werte bei bewölkten Verhältnissen höher als an Strahlungstagen. Dies liegt daran, dass bei vornehmlich diffuser Strahlung diese vermehrt ohne Wechselwirkung mit der Vegetation in den Bestand eindringen kann [MÉTHY ET AL., 1987, MORGAN ET AL., 1985].

Der Verlauf des Laubaustriebs und der Seneszenz wird im Allgemeinen mittels Boniturdaten ermittelt. Ein Vergleich dieser Daten mit Tagesmittelwerten des R/FR zeigt, dass dieses Spektralverhältnis als guter Indikator für den Pflanzenschatten und damit für die Kronendichte dienen kann (Kap. 3.3.4). Daher ist es möglich Laubaustrieb und Laubfall der Buche anhand eines einzelnen Sensors in der Baumkrone mit hoher Wahrscheinlichkeit zu charakterisieren.

In dieser Arbeit können aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie der kontinuierlich messenden Versuchsanordnung viele Faktoren (Tagesgänge, Saisonalität, Unterschiede zwischen einer Laub- und einer Nadelbaumart, integrale Strahlungsgrößen, spektrale Zusammensetzungen etc.) gemeinsam untersucht und ein umfassendes Bild über das Strahlungsregime eines Fichten-Buchen-Mischwaldes in mittleren Breiten vermittelt werden. Neben der Vielzahl an Messwerten, die die auftretenden Häufigkeiten von Strahlungsniveaus in Schattenbereichen, Halbschattenbereichen und Lichtflecken durch statistische Verteilungen charakterisieren kann, besteht die Möglichkeit, diese Untersuchung für jede Wellenlänge bzw. jedes Wellenlängenintervall in jeder Kronenschicht und am Bestandesboden durchzuführen.

Diese spektrale Auflösung der Messungen im PAR-Bereich eröffnet in einem nächsten Bearbeitungsschritt die Möglichkeit, je nach Pflanzenart die photosynthetisch

nutzbare Strahlung (PUR) zu berechnen. Diese Größe, die etwa 61 % der PAR ausmacht und von der speziellen Quantensensibilität grüner Pflanzen abhängt [DOHRENBUSCH ET AL., 1995], ist die entscheidende für die Photosynthese. Die PUR wird allerdings von herkömmlichen integrierenden PAR-Sensoren deutlich überschätzt. Ziel einer Folgeuntersuchung wird es sein, Artenunterschiede im Sinne von unterschiedlichen wellenlängenabhängigen Aktionsspektren zu berücksichtigen und damit die für die Bestimmung der Photosynthese tatsächlich relevanten Strahlungskomponenten zu quantifizieren. Hierfür wird es nötig sein die lokalen artspezifischen Wirkungsspektren experimentell zu ermitteln.

Der messbare Spektralbereich deckt einen Großteil der photosynthetisch und photomorphogenetisch entscheidenden Wellenlängen ab. Allerdings könnte eine Erweiterung des Spektralbereichs auf den UV-A-Bereich jenseits der 360 nm bis in den UV-B-Bereich in einem zukünftigen Schritt weitere Erkenntnisse über die Verteilung dieser ebenfalls morphogenetisch aktiven Strahlung liefern. Auch mögliche Schäden der Biomasse durch die energiereiche UV-Strahlung könnten bei einer hochauflösten Charakterisierung auf Bestandesebene besser identifiziert werden. Den limitierenden Faktor zur Messung des Spektralbereichs < 360 nm mit der beschriebenen Anlage stellt dabei der POM-Diffusorkopf dar, der aufgrund seiner Absorptionscharakteristik im UV-Bereich einen Großteil der Strahlung extingiert. Für die niedrigen Intensitäten im UV-Bereich im Kronenschatten unterschreitet die durch den Sensorkopf transmittierte Strahlungsquantität das Detektionslimit der Anlage. Die Entwicklung eines Diffusors aus Quarzglas oder einem anderen UV-durchlässigen Material könnte einen Fortschritt bringen. Jedoch muss die Richtungsunabhängigkeit der Lichteinkopplung gewährleistet sein. Hierzu wurden bereits Versuche mit unterschiedlichen Materialien unternommen, die bisher allerdings im Sinne der Richtungscharakteristik keine befriedigenden Ergebnisse geliefert haben.

Die spektrale Erweiterung eines bestehenden, gut dokumentierten und validierten, dreidimensionalen Strahlungstransportmodells und dessen Anpassung an einen Mischbestand ermöglicht die Übertragung der Erkenntnisse aus den Messungen in andere Modelle und Ansätze. Es lassen sich Rückschlüsse auf die Veränderung der Strahlungsverteilung ziehen, die durch waldbauliche Maßnahmen wie Aufflichtung und Durchforstung zustande kommen. Gerade im Hinblick auf die Verjüngung von Altbeständen und der Eigenschaft der blauen Strahlungsanteile als Initiator zur Keimung von Samen kann in Zukunft ein wichtiger Beitrag geleistet werden.

Die Validierung des Modells hat gezeigt, dass die berechneten Strahlungsquantitäten die Realität bei der Fichte sehr gut nachbilden können. Bei der Buche erfolgt in den meisten Fällen eine Überschätzung der tatsächlichen Strahlungswerte. Gründe hierfür liegen unter anderem an Fehlern und Abweichungen in den Eingangsgrößen, vor allem der Blattflächendichte, die, wie gezeigt wurde, durchaus signifikante Auswirkungen auf das Modellergebnis haben kann. Für weitere Unsicherheiten können die aus der Literatur entnommenen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten verantwortlich gemacht werden. Eine Bestimmung dieser Parameter und ihrer sai-

sonalen Variationen kann eine Verbesserung bewirken. Ein weiterer Punkt liegt im Heranziehen eines planophilen Ansatzes für die Blattnormalenverteilung der Buche aus der Literatur. Auch hier wird eine bessere Bestimmung vor Ort mögliche Fehlerquellen ausschließen können, obwohl der Einfluss dieser Größe auf das Ergebnis relativ gering ist.

Die spektrale Zusammensetzung der Strahlungswerte in der Fichten- und Buchenkrone wird durch das Modell gut beschrieben. Eine etwas größere Übereinstimmung zwischen Modell und Freiland findet sich bei der Buche. Die Modellierung der Strahlungsqualität ist auf den PAR-Bereich beschränkt. Das photomorphogenetisch relevante R/FR kann aus gemessenen Beziehungen zur Strahlungsquantität ermittelt werden. Durch einen zusätzlichen Rechenschritt liefert das Modell für jeden Voxel des Bestandes einen Wert für das R/FR aus der empirisch ermittelten Funktion. Die Abschätzung dieses Spektralverhältnisses ist hingegen besser bei der Fichte als bei der Buche. Die zum Teil deutliche Überschätzung in der Buchenkrone liegt an den bereits überschätzten Werten der Strahlungsquantität und dem damit verbundenen Anstieg der R/FR aus der hyperbolischen Sättigungsfunktion.

Die Kombination der Modellierung der Strahlungsquantität und -qualität sowohl photosynthetisch als auch photomorphogenetisch aktiver Strahlung in hoher Auflösung mit sehr hoch aufgelösten Messwerten liefert eine breite Basis zur kleinräumigen Beschreibung des Strahlungsklimas in Mischbeständen.

Ein wichtiger Schritt in zukünftigen Untersuchungen muss es sein, die aus dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zur spektralen Strahlungsverteilung mit experimentell erhobenen Daten der Biomasseverteilung, der Kronenraumbesetzung, der Photosynthese, der Regeneration von Pflanzenbeständen und weiterer physiologischer und morphologischer Parameter zu verknüpfen.

Literatur

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, 189-197.

AHMAD, M., JARILLO, J.A., SMIRNOVA, O., CASHMORE, A.R. (1998): Cryptochrome blue-light photoreceptors of Arabidopsis implicated in phototropism. *Nature* 392, 720-723.

AMMER, C. (2000): Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft. Shaker Verlag, Aachen.

AMMER, C. (2003): Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. *Ann. For. Sci.* 60, 163-171.

ANDERSON, M.C. (1970): Interpreting the fraction of solar radiation available in forest. *Agric. Meteorol.* 7, 19-28.

ANDERSON, M.C. (1971): Radiation and Crop Structure. In: ŠESTÁK, Z., ČATSKÝ, J., JARVIS, P.G. (Hrsg.): Plant Photosynthetic Production - Manual of Methods. Dr. W. Junk N.V. Publishers The Hague, 412-466.

ANISIMOV, O. UND FUKSHANSKY, L. (1993): Light-vegetation interaction: a new stochastic approach for description and classification. *Agric. For. Meteorol.* 66, 93-110.

ANISIMOV, O. UND FUKSHANSKY, L. (1997): Optics of vegetation: implications for the radiation balance and photosynthetic performance. *Agric. For. Meteorol.* 85, 33-49.

ASRAR, G., HIPPS, L.E., KANEMASU, E.T. (1984): Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: a case study. *Agric. For. Meteorol.* 31, 47-58.

BALDOCCHI, D.D., MATT, D.R., HUTCHINSON, B.A., McMILLEN, R.T. (1984a): Solar radiation within an oak-hickory forest: an evaluation of the extinction coefficients for several radiation components during fully-leafed and leafless periods. *Agric. For. Meteorol.* 32, 307-322.

BALDOCCHI, D.D., HUTCHINSON, B.A., MATT, D.R., McMILLEN, R.T. (1984b): Seasonal variations in the radiation regime within an oak-hickory forest. *Agric. For. Meteorol.* 33, 177-191.

BALDOCCHI, D.D., HUTCHINSON, B.A., MATT, D.R., McMILLEN, R.T. (1986): Seasonal variation in the statistics of photosynthetically active radiation penetration in an oak-hickory forest. *Agric. For. Meteorol.* 36, 343-361.

- BARTELINK, H.H. (1998): Radiation interception by forest trees: a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. *Ecological Modelling* 105, 213-225.
- 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. Meteorol.* 44, 217-232.
- BÉGUÉ, A., HANAN, N.P., PRINCE, S.D. (1994): Radiative transfer in shrub savanna sites in Niger — preliminary results from HAPEX-II-Sahel: II. PAR interception in the woody layer. *Agric. For. Meteorol.* 69, 247-266.
- BERNHARD, G. (1993): Einfluß von Diffusor-Eigenschaften auf die Bestimmung von Bestrahlungsstärken im UV-Bereich: Versuchsaufbau, Messung und Korrekturverfahren. IFU Schriftenreihe Band 22-93, Garmisch-Partenkirchen.
- BJÖRN, L.O. UND VOGELMANN, T.C. (1994): Quantification of light. In: KENDRICK, R.E., KRONENBERG, G.H.M. (Hrsg.): *Photomorphogenesis in plants* — 2nd edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- BJÖRN, L.O. (1995): Estimation of fluence rate from irradiance measurements with a cosine-corrected sensor. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* 29, 179-183.
- BJÖRN, L.O. UND VOGELMANN, T.C. (1996): Quantifying Light and Ultraviolet Radiation in Plant Biology. *Photochem. Photobiol.* 64, 403-406.
- 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, 123-131.
- BROWN, P.S. UND PANDOLFO, J.P. (1969): An equivalent-obstacle model for the computation of radiative flux in obstructed layers. *Agric. Meteorol.* 6, 407-421.
- BRUNNER, A. (1993): Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen und eine Methodenstudie zur ökologischen Lichtmessung im Wald. *Forstliche Forschungsberichte München* 128. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt.
- BRUNNER, A. (1994): Ökologische Lichtmessung im Wald. *Forstarchiv* 65, 133-138.
- BRUNNER, A. (1998): A light model for spatially explicit forest stand models. *Forest Ecology and Management* 107, 19-46.
- BYRNE, G.F. (1966): A simple way of improving the angular response of solid state photodetectors. *Agric. Meteorol.* 3, 367-368.
- CAPERS, R.S. UND CHAZDON, R.L. (2004): Rapid assessment of understory light availability in a wet tropical forest. *Agric. For. Meteorol.* 123, 177-185.

- CESCATTI, A. (1997a): Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling* 101, 263-274.
- CHAZDON, R.L. UND FIELD, C.B. (1987): Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73, 525-532.
- CHEN, J.M. UND BLACK, T.A. (1992): Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. *Agric. For. Meteorol.* 60, 249-266.
- CHRISTIE, J.M. UND BRIGGS, W.R. (2001): Blue light sensing in higher plants. *J. Biol. Chem.* 276, 11457-11460.
- 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, 129-139.
- COMBES, D., SINOQUET, H., VARLET-GRANCHER, C. (2000): Preliminary measurement and simulation of the spatial distribution of the Morphogenetically Active Radiation (MAR) within an isolated tree canopy. *Ann. For. Sci.* 57, 497-511.
- CONSTABEL, A.J. UND LIEFFERS, V.J. (1996): Seasonal patterns of light transmission through boreal mixedwood canopies. *Can. J. For. Res.* 26, 1008-1014.
- COURBAUD, B., DE COLIGNY, F., CORDONNIER, T. (2003): Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agric. For. Meteorol.* 116, 1-18.
- 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, 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, 141-152.
- DE CASTRO, F. UND FETCHER, N. (1998): Three dimensional model of the interception of light by a canopy. *Agric. For. Meteorol.* 90, 215-233.
- DE CASTRO, F. (2000): Light spectral composition in a tropical forest: measurements and model. *Tree Physiol.* 20, 49-56.
- DE CHANTAL, M., LEINONEN, K., KUULUVAINEN, T., CESCATTI, A. (2003) : Early response of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings to an experimental canopy gap in a boreal spruce forest. *Forest Ecology and Management* 176, 321-336.
- DIRMHIRN, I. (1964): Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Frankfurt/Main.
- DOHRENBUSCH, A. (1995): Überlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessungen im Wald. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 166, 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.* 166, 154-160.
- EBERLEIN, D. (1998): Arbeitsblätter: Lichtwellenleiter. *Funkschau* 5/98. <http://www.funkschau-handel.de/heftarchiv/pdf/1998/fs05/fs9805073.pdf>.
- ENDLER, J.A. (1993): The color of light in forests and its implications. *Ecol. Monographs* 63, 1-27.
- EVANS, G.C., COOMBE, D.E. (1959): Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J. Ecol.* 47, 103-113.
- FEDERER, C.A. UND TANNER, C.B. (1966): Spectral distribution of light in the forest. *Ecol.* 47, 555-560.
- FEDERER, C.A. (1971): Solar radiation absorption by leafless hardwood forests. *Agric. Meteorol.* 9, 3-20.
- FRITSCHEN, L.J. UND GAY, L.W. (1979): Environmental Instrumentation. Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin.
- 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: REICHLER, E.D. (Hrsg.): Dynamic properties of forest ecosystems. *International Biological Programme* 23, Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney. 87-204.
- 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, 55-70.
- GERTHSEN, C., KNESER, H.O., VOGEL, H. (1974): Physik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- GHOLZ, H.L., VOGEL, S.A., CROPPER, JR., W.P., MCKELVEY, K., EWEL, K.C. (1991): Dynamics of canopy structure and light interception in *Pinus elliotii* stands, Northern Florida. *Ecol. Monographs* 61, 33-51.
- 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, 59-70.
- GRANT, R.H., HEISLER, G.M., GAO, W. (1996): Photosynthetically-active radiation: sky radiance distributions under clear and overcast conditions. *Agric. For. Meteorol.* 82, 267-292.
- GRANT, R.H. (1997): Partitioning of biologically active radiation in plant canopies. *Int. J. Biometeorol.* 40, 26-40.

GROTE, R. (2002): Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species. *Silva Fennica* 36, 779-788.

GROTE, R. UND PRETZSCH, H. (2002): A model for individual tree development based on physiological processes. *Plant Biol.* 4, 167-180.

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, 215-229.

GUTSCHICK, V., 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, 281-290.

HÄBERLE, K.H., REITER, I.M., NUNN, A.J., GRUPPE, A., SIMON, U., GOSSNER, M., WERNER, H., LEUCHNER, M., HEERDT, C., FABIAN, P., MATYSSEK, R. (2003): KROCO, Freising, Germany: canopy research in a temperate mixed forest of Southern Germany. In: BASSET, Y., HORLYCK, V., WRIGHT, S.J. (Hrsg.): Studying forest canopies from above: The International Canopy Crane Network. Smithsonian Tropical Research Institute and UNEP, Panama, 71-78.

HÄCKEL, H. (1985): Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

HANAN, N.P. UND BÉGUÉ, S.D. (1995a): A method to estimate instantaneous and daily intercepted photosynthetically active radiation using a hemispherical sensor. *Agric. For. Meteorol.* 74, 155-168.

HANAN, N.P., PRINCE, S.D., BÉGUÉ, A. (1995b): Estimation of photosynthetically active radiation and vegetation net production efficiency using satellite data. *Agric. For. Meteorol.* 76, 259-276.

HARTMANN, K.M. (1978): Aktionsspektrometrie. In: HOPPE, W., LOHMANN, W., MARKL, H., ZIEGLER, H. (Hrsg.): Biophysik - Ein Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 197-222.

HASSIKA, P. UND BERBIGIER, P. (1998): Annual cycle of photosynthetically active radiation in maritime pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 90, 157-171.

HENDRICH, C. (2000): Ein kybernetisches Licht-Biomasse-Modell für Fichten-Buchen-Mischbestände. Dissertation. München.

HIPPS, L.E., ASRAR, G., KANEMATSU, E.T. (1983): Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. *Agric. Meteorol.* 28, 253-259.

HOLMES, M.G. (1981): Spectral distribution of radiation within plant canopies. In: SMITH, H. (Hrsg.): Plants and the daylight spectrum. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney, San Fransisco, 147-158.

HUGHES, J.E., MORGAN, D.C., BLACK, C.R. (1985): Transmission properties of an oak canopy in relation to photoperception. *Plant Cell Environ.* 8, 509-516.

- HUTCHINSON, B.A. UND MATT, D.R. (1976): Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.* 17, 93-110.
- HUTCHINSON, B.A. UND MATT, D.R. (1977): The annual cycle of solar radiation in a deciduous forest. *Agric. Meteorol.* 18, 255-265.
- KAUFMANN, W.F. UND HARTMANN, K.M. (1989): Low cost digital spectroradiometer. *Photochem. Photobiol.* 49, 769-774.
- KERSTEN, R. (1984): Faseroptische Sensoren. *Physik in unserer Zeit* 15, 139-144.
- KIMES, D.S., SELLERS, P.J., NEWCOMB, W.W. (1987): Hemispherical reflectance variations of vegetation canopies and implications for global and regional energy budget studies. *J. Clim. App. Meteorol.* 26, 959-972.
- KIMES, D.S. (1991): Radiative transfer in homogeneous and heterogeneous vegetation canopies. In: MYNENI, R.B., ROSS, J. (Hrsg.): Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Springer-Verlag, Berlin, 339-388.
- KNYAZIKHIN, Y. UND MARSHAK, A. (1991): Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies and iterative methods for their solution. In: MYNENI, R.B., ROSS, J. (Hrsg.): Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Springer-Verlag, Berlin, 9-43.
- KNYAZIKHIN, Y., KRANIGK, J., MIESSEN, G., PANFYOROV, O., VYGODSKAYA, N., GRAVENHORST, G. (1996): Modeling three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in sloping coniferous stands. *Biomass & Bioenergy* 11, 189-200.
- KNYAZIKHIN, Y., 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, 215-239.
- KNYAZIKHIN, Y., KRANIGK, J., MYNENI, R.B., PANFYOROV, O., GRAVENHORST, G. (1998): Influence of small-scale structure on radiative transfer and photosynthesis in vegetation canopies. *Journal of Geophysical Research* 103, 6133-6144.
- KONDRATYEV, K.Y. (1969): Radiation in the atmosphere. Academic Press, New York.
- KRANIGK, J. UND GRAVENHORST, G. (1993): Ein dreidimensionales Modell für Fichtenkronen. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 164, 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, 193-197.

- KUBÍN, Š. (1971): Measurement of Radiant Energy. In: ŠESTÁK, Z., ČATSKÝ, J., JARVIS, P.G. (Hrsg.): Plant Photosynthetic Production - Manual of Methods. Dr. W. Junk N.V. Publishers The Hague, 702-765.
- KUCHLING, H. (1999): Taschenbuch der Physik. 16. Aufl. Fachbuchverlag, Leipzig.
- LEE, D.W. (1987): The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests. *Biotropica* 19, 161-166.
- LEE, D.W. (1989): Canopy dynamics and light climates in a tropical moist deciduous forest in India. *J. Tropical Ecol.* 5, 65-79.
- LEMEUR, R. UND BLAD, B.L. (1974): A critical review of light models for estimating the shortwave radiation regime of plant canopies. Lang, A.R.G., Yueqin, X., Norman, J.M. (1985): Crop structure and the penetration of direct sunlight. *Agric. Meteorol.* 14, 255-286.
- LEMEUR, R., GIETL, G., HAGER, H. (1979): Comparison of radiation models. In: HALLDIN, S. (Hrsg.): Comparison of forest water and energy exchange models. International Society for Ecological Modelling. Copenhagen, 187-199.
- LEMEUR, R. UND ROSENBERG, N.J. (1979): Simulating the quality and quantity of short-wave radiation within and above canopies. In: HALLDIN, S. (Hrsg.): Comparison of forest water and energy exchange models. International Society for Ecological Modelling. Copenhagen, 77-100.
- LEUCHNER, M., REITMAYER, H., FABIAN, P., WERNER, H. (2003): unveröffentlichte Daten.
- LEUCHNER, M., FABIAN, P., WERNER, H. (2005): Spectral multichannel monitoring of radiation within a mature mixed forest. *Plant Biol.* 7, 619-627.
- LIU, K.N. (1980): An introduction to atmospheric radiation. San Diego.
- LÖW, M. UND WEIGT, R. (2005): unveröffentlichte Daten.
- MCCREE, K.J. (1966): A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 3, 353-366.
- MCCREE, K.J. (1972): The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9, 191-216.
- MCPHERSON, H.G. (1969): Photocell-filter combinations for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 6, 347-356.
- MESSIER, C. UND BELLEFLEUR, P. (1988): Light quantity and quality on the forest floor of pioneer and climax stages in a birch-beech-sugar maple stand. *Can. J. For. Res.* 18, 615-622.
- MESSIER, C., HONER, T.W., KIMMINS, J.P. (1989): Photosynthetic photon flux density, red:far-red ratio, and minimum light requirement for survival of *Gaultheria*

shallon in western red cedar - western hemlock stands in coastal British Columbia. *Can. J. For. Res.* 19, 1470-1477.

MÉTHY, M., FABREGUETTES, J., JARDON, F., ROY, J. (1987): Design of a simple instrument for the measurement of red/far-red ratios. *Acta Oecologica/Oecol. Plant* 8, 281-290.

MIDDLETON, E.M., CHAN, 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, 108-119.

MIESSEN, G. (1994): Modellierung des dreidimensionalen Transports von photosynthetisch aktiver Strahlung in einem Fichtenbestand im Solling. Diplomarbeit. Göttingen.

MITSCHERLICH, G. (1981): Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Bd. 2: Waldklima und Wasserhaushalt. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt/Main.

MONSI, M., SAEKI, T. (1953): Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. J. Bot.* 14, 22-52.

MONTEITH, J.L. (1972): Survey of instrumentation for micrometeorology. IBP Handbook 22. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne.

MONTEITH, J.L. (1976): Spectral distribution of light in leaves and foliage. In: SMITH, H. (Hrsg.): Light and plant development. Butterworth, London, 447-460.

MOON, P. UND SPENCER, D.E. (1942): Illumination from a non-uniform sky. *Illuminating Eng.* 37, 707-726.

MORGAN, D.C. (1981): Shadelight quality effects on plant growth. In: SMITH, H. (Hrsg.): Plants and the daylight spectrum. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney, San Francisco.

MORGAN, D.C. UND SMITH, H. (1981): Non-photosynthetic responses to light quality. In: LANGE, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.P., ZIEGLER, H. (Hrsg.): Physiological Plant Ecology I - Responses to the physical environment. Encyclopedia of Plant Physiology, New Series, Vol. 12A. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 109-134.

MORGAN, D.C., WARRINGTON, I.J., ROOK, D.A. (1985): Some observations on the spectral distribution characteristics of short-wave radiation within *Pinus radiata* D. Don canopies. *Plant Cell Environ.* 8, 201-206.

MÖTTUS, M. (2004): Measurement and modelling of the vertical distribution of sunflecks, penumbra and umbra in willow coppice. *Agric. For. Meteorol.* 121, 79-91.

- MURAOKA, H., HIROTA, H., MATSUMOTO, J., NISHIMURA, S., TANG, Y., KOIZUMI, H., WASHITANI, I. (2001): On the convertibility of different microsite light availability indices, relative illuminance and relative photon flux density. *Funct. Ecol.* 15, 798-803.
- MUTH, C.C. UND BAZZAZ, F.A. (2002): Tree seedling canopy responses to conflicting photosensory cues. *Oecologia* 132, 197-204.
- 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 considerations. *Agric. For. Meteorol.* 37, 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, 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, 1-153.
- MYNENI, R.B. (1991): Modeling radiative transfer and photosynthesis in three-dimensional vegetation canopies. *Agric. For. Meteorol.* 55, 323-344.
- MYNENI, R.B. UND ROSS, J. (Hrsg.) (1991): Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Sammelband. Springer-Verlag, Berlin.
- MYNENI, R.B., MARSHAK, A., KNYAZIKHIN, Y., ASRAR, G. (1991): Discrete ordinates method for photon transport in leaf canopies. In: MYNENI, R.B., ROSS, J. (Hrsg.): Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing. Springer-Verlag, Berlin, 45-109.
- NUNN, A.J. (2004): Risiko-Einschätzung der chronisch erhöhten Ozonbelastung mittels „Free-Air“-Begasung von Buchen (*Fagus sylvatica*) und Fichten (*Picea abies*) eines forstlich begründeten Mischbestandes. Dissertation. Freising.
- NUNN, A.J., KOZOVITS, A.R., REITER, I.M., HEERDT, C., LEUCHNER, M., LÜTZ, C., LIU, X., LÖW, M., WINKLER, J.B., GRAMS, T.E.E., HÄBERLE, K.H., WERNER, H., FABIAN, P., MATYSSEK, R. (2005): Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*). *Environ. Pollution* 137, 494-506.
- OKER-BLOM, P. (1985): The influence of penumbra on the distribution of direct solar radiation in a canopy of Scots pine. *Photosynthetica* 19, 312-317.
- OKER-BLOM, P., PUKKALA, T., KUULUVAINEN, T. (1989a): Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies: effect of stand structure and latitude. *Ecological Modelling* 49, 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, 469s-472s.

OKER-BLOM, P., KAUFMANN, M.R., RYAN, M.G. (1991a): Performance of a canopy light interception model for conifer shoots, trees and stands. *Tree Physiology* 9, 227-243.

OKER-BLOM, P., LAPPI, J., SMOLANDER, H. (1991b): Radiation regime and photosynthesis of coniferous stands. In: MYNENI, R.B., ROSS, J. (Hrsg.): *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Plant Physiology and Optical Remote Sensing*. Springer-Verlag, Berlin, 469-499.

OLESEN, T. (1992): Daylight spectra (400-740nm) beneath sunny, blue skies in Tasmania, and the effect of a forest canopy. *Austral. J. Ecol.* 17, 451-461.

PALMROTH, S., PALVA, L., STENBERG, P., KOTISAARI, A. (1999): Fine scale measurement and simulation of penumbral radiation formed by a pine shoot. *Agric. For. Meteorol.* 95, 15-25.

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, 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, 163-171.

PALVA, L., MARKKANEN, T., SIIVOLA, E., GARAM, E., LINNAVUO, M., NEVAS, S., MANOOCHEHRI, F., PALMROTH, S., RAJALA, K., RUOTOISTENMAKI, H., VUORIVIRTA, T., SEPPALA, I., VESALA, T., HARI, P., SEPPONEN, R. (2001): Tree scale distributed multipoint measuring system of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 106, 71-80.

PANFYOROV, O., KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R.B., SZARZYNSKI, J., ENGWALD, S., SCHNITZLER, K.G., GRAVENHORST, G. (2001): The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 39, 241-253.

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, 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, 97-103.

PARKER, G.G., LEFSKY, M.A., HARDING, D.J. (2001): Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. *Remote Sens. Environ.* 76, 298-309.

PARKER, G.G., DAVIS, M.M., CHAPOTIN, S.M. (2002): Canopy light transmittance in Douglas fir - western hemlock stands. *Tree Physiol.* 22, 147-157.

PTB (2004): Die gesetzlichen Einheiten in Deutschland. Broschüre der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. <http://www.ptb.de/de/publikationen/download/einheiten.pdf> (Abfrage: 19.12.2005).

PTB (2005): Leitfaden für den Gebrauch des Internationalen Einheitensystems. Broschüre der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. http://www.ptb.de/de/publikationen/download/si_v1.pdf (Abfrage: 19.12.2005).

PIERCE, L.L. UND RUNNING, S.W. (1988): Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecol.* 69, 1762-1767.

POKROWSKI, G.I. (1929): Über die Helligkeitsverteilung am Himmel. *Physikal. Zeitschr.* 30, 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., KUUVAINEN, T., OKER-BLOM, P. (1991): Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies. *Agric. For. Meteorol.* 55, 295-307.

PUKKALA, T., KUULUVAINEN, T., STENBERG, 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, 313-325.

RAMANN, E. (1911): Lichtmessungen in Fichtenbeständen. *Allg. Forst u. J. Ztg.* 87, 401-406.

REIFSNYDER, W.E., FURNAVAL, G.M., HOROWITZ, J.L. (1971): Spatial and temporal distribution of solar radiation beneath forest canopies. *Agric. Meteorol.* 9, 21-37.

REITER, I.M. (2004): Space-related resource investments and gains of adult beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) as a quantification of aboveground competitiveness. Dissertation. Freising.

REITMAYER, H. (2000): Quantifizierung des spektralen Angebotes photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) innerhalb eines Fichten-Buchen-Mischbestandes. Dissertation. Freising.

REITMAYER, H., WERNER, H., FABIAN, P. (2002): A novel system for spectral analysis of solar radiation within a mixed beech-spruce stand. *Plant Biol.* 4, 228-233.

- RENGER, G. (1978): Photosynthese. In: HOPPE, W., LOHMANN, W., MARKL, H., ZIEGLER, H. (Hrsg.): Biophysik - Ein Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 414-441.
- RICH, P.M. (1990): Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing* 5, 13-29.
- RITCHIE, G.A. (1997): Evidence for red:far red signaling and photomorphogenic growth response in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Tree Physiol.* 17, 161-168.
- ROSS, J. (1981): The radiation regime and architecture of plant stands. Tasks for vegetation sciences 3. Dr. W. Junk Publishers. The Hague, Boston, London.
- ROSS, J. UND SULEV, M. (2000): Sources of errors in measurements of PAR. *Agric. For. Meteorol.* 100, 103-125.
- ROUJEAN, J.L. (1999): Measurements of PAR transmittance within boreal forest stands during BOREAS. *Agric. For. Meteorol.* 93, 1-6.
- 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, 226-238.
- 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, 209-216.
- SEIFERT, T. (2005): unveröffentlichte Daten.
- SINOQUET, H. UND BONHOMME, R. (1992): Modelling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. *Agric. For. Meteorol.* 62, 219-240.
- SINOQUET, H., RAKOCEVIC, M., VARLET-GRANCHER, C. (2000): Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. *Agric. For. Meteorol.* 101, 251-263.
- SMITH, H. UND HOLMES, M.G. (1977): The function of phytochrome in the natural environment III. Measurement and calculation of phytochrome photoequilibrium. *Photochem. Photobiol.* 25, 547-550.
- SMITH, H. (1981): Plants and the daylight spectrum. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney, San Fransisco.
- SMITH, H. UND MORGAN, D.C. (1981): The spectral characteristics of the visible radiation incident upon the surface of the earth. In: SMITH, H. (Hrsg.): Plants and the daylight spectrum. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney, San Fransisco, 3-20.
- SMITH, H. (1982): Light quality, photoperception, and plant strategy. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 33, 481-518.

- SMITH, H. (1986): The perception of light quality. In: KENDRICK, R.E., KRONENBERG, G.H.M. (Hrsg.): *Photomorphogenesis in plants*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Boston, Lancaster, 187-217.
- SMITH, H., CASAL, J.J., JACKSON, G.M. (1990): Reflection signals and the perception by phytochrome of the proximity of neighbouring vegetation. *Plant, Cell and Environ.* 13, 73-78.
- SMITH, H. UND WHITELAM, G.C. (1997): The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell and Environ.* 20, 840-844.
- SMITH, H. (2000): Phytochromes and light signal perception by plants - an emerging synthesis. *Nature* 407, 585-591.
- SMOLANDER, S., STENBERG, P., LINDER, S. (1994): Dependence of light interception efficiency of Scots pine shoots on structural parameters. *Tree Physiology* 14, 971-980.
- 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, 217-229.
- STADT, K.J. UND LIEFFERS, V.J. (2000): MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands. *Agric. For. Meteorol.* 102, 235-252.
- STENBERG, P. (1995): Penumbra in within-shoot and between-shoot shading in conifers and its significance for photosynthesis. *Ecological Modelling* 77, 215-231.
- ST. JACQUES, C. UND BELLEFLEUR, P. (1993): Light requirement of some broad-leaf tree seedlings in natural conditions. *For. Ecol. Manage.* 56, 329-341.
- SZWARCBAUM, I. UND SHAVIV, G. (1976): A Monte-Carlo model for the radiation field in plant canopies. *Agric. Meteorol.* 17, 333-352.
- TANNER, V. UND ELLER, B.M. (1985): Veränderung der spektralen Eigenschaften der Blätter der Buche (*Fagus sylvatica* L.) von Laubaustrieb bis Laubfall. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 157, 108-116.
- TASKER, R. UND SMITH, H. (1977): The function of phytochrome in the natural environment - V. Seasonal changes in the radiant energy quality in woodlands. *Photochem. Photobiol.* 26, 487-491.
- TEGELBERG, R., JULKUNEN-TIITTO, R., APHALO, P.J. (2004): Red : far-red light ratio and UV-B radiation: their effects on leaf phenolics and growth of silver birch seedlings. *Plant Cell and Environ.* 27, 1005-1013.
- TURNBULL, M.H. UND YATES, D.J. (1993): Seasonal variation in the red/far-red ratio and photon flux density in an Australian sub-tropical rainforest. *Agric. For. Meteorol.* 64, 111-127.

- VANDERBILT, V.C. UND GRANT, L. (1985): Plant canopy specular reflectance model. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 23, 722-730.
- VARLET-GRANCHER, C., MOULIA, B., SINOQUET, H., RUSSEL, G. (1993) : Spectral modification of light within plant canopies. In: VARLET-GRANCHER, C., BONHOMME, R., SINOQUET, H. (Hrsg.): Crop structure and light microclimate : characterization and application. INRA, Versailles, 427-452.
- VOGELMANN, T.C. UND BJÖRN, L.O. (1984): Measurement of light gradients and spectral regime in plant tissue with a fiber optic probe. *Physiol. Plant.* 60, 361-368.
- VOGELMANN, T.C., KNAPP, A.K., MCCLEAN, T.M., SMITH, W.K. (1988): Measurement of light within plant tissues with fiber optic microprobes. *Physiol. Plant.* 72, 623-630.
- WAGNER, S. (1998): Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agric. For. Meteorol.* 90, 103-117.
- WAGNER, S., KÜSSNER, R., AMMER, C., DOHRENBUSCH, A. (2004): Hinweise zur Erfassung von Strahlung und Kronenraumstruktur in Waldbeständen im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen. *Forstarchiv* 75, 110-121.
- WANG, Y.P. UND JARVIS, P.G. (1990): Description and validation of an array model - MAESTRO. *Agric. For. Meteorol.* 51, 257-280.
- WEISS, A. UND NORMAN, J.M. (1985): Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agric. For. Meteorol.* 34, 205-213.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G.J., JONCKHEERE, I., COPPIN, P. (2004): Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.* 121, 37-53.
- WILLIAMS, D.L. (1991): A comparison of spectral reflectance properties at the needle, branch, and canopy level for selected conifer species. *Remote Sens. Environ.* 35, 79-93.
- WIRTH, R., WEBER, B., RYEL, R.J. (2001): Spatial and temporal variability of canopy structure in a tropical moist forest. *Acta Oecologia* 22, 235-244.
- WOODWARD, F.J. (1983): Instruments for the measurements of photosynthetically active radiation and red, far-red and blue light. *J. Appl. Ecol.* 20, 103-115.
- ZEIGER, E., FIELD, C., MOONEY, H.A. (1981): Stomatal opening at dawn: possible roles of the blue light response in nature. In: SMITH, H. (Hrsg.): Plants and the daylight spectrum. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney, San Francisco, 391-407.

Abbildungsverzeichnis

1	Aufnahme der Intensivmessfläche im Kranzberger Forst vom Kran. Die Buchengruppe (innerhalb der Gerüsttürme) ist von den Fichten umschlossen. Drei der vier Türme sind in vier Ebenen mit einem Gerüst verbunden.	9
2	Absorptionsspektren von Chloroplastenpigmenten in Lösung [aus RENGGER, 1978]	20
3	Längsschnitt durch einen Stufenindex-Lichtwellenleiter	21
4	Sphärischer Sensor zur Messung der Photonenflussrate (PFR) aus dem gesamten Raumwinkel Ω mit Schutzkäfig. Der Sensor setzt sich aus einem sphärischen POM - Diffusorkopf und einer darin befestigten Quarzglasfaser zusammen.	24
5	Emissionsspektrum einer 400 W Wolfram-Halogen-Lampe in 700 mm Abstand zum Spektrometer	29
6	Antwortkurve des Spektrometers bei einer 1000 W Wolfram-Halogen-Lampe in 700 mm Abstand	30
7	Reproduzierbarkeit des Kalibriervorgangs bei zehnfacher Wiederholung der Messungen an einem zufällig ausgewählten Sensor. Zur besseren Anschaulichkeit ist nur jede zehnte Wellenlänge dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardabweichungen.	32
8	Wellenlängenspezifische Kalibrierfaktoren eines zufällig ausgewählten Sensors	33
9	Zweidimensionale Darstellung der Kugeloberfläche mit den 30 Kalibrierpositionen (der „Nordpol“ wurde doppelt kalibriert). Positive Breiten bedeuten „nördliche“, negative „südliche“ Hemisphäre. Am „Südpol“ konnte aufgrund der LWL - Einkopplung nicht kalibriert werden.	34
10	Vergleich der spektralen Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung eines zufällig ausgewählten Sensors. Dargestellt sind die spektralen Variationskoeffizienten für alle Raumrichtungen und für den oberen Halbraum.	34
11	Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung eines zufällig ausgewählten Sensors (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom Mittelwert der 87 Messungen (29 Richtungen in drei Wiederholungen).	35
12	Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung in der Nordhemisphäre eines zufällig ausgewählten Sensors (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom Mittelwert der 39 Messungen (13 Richtungen in drei Wiederholungen) der Nordhalbkugel.	36

13	Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung von 126 Sensoren (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert aller Sensoren. Der Variationskoeffizient der Richtungscharakteristik für alle Sensoren und Einkopplungswinkel beträgt 4,8%.	36
14	Richtungscharakteristik der Lichteinkopplung in die Nordhalbkugel von 126 Sensoren (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt sind die relativen Abweichungen vom arithmetischen Mittelwert aller Sensoren. Der Variationskoeffizient der Richtungscharakteristik für alle Sensoren und Einkopplungswinkel der nördlichen Hemisphäre beträgt 2,0%.	37
15	Schematische Darstellung der zentralen Messeinheit mit Spektrometer, X-Y-Positioniertisch, Gehäuse mit integrierten Multiplexer und Glasfaserenden. Die Schnittstelle der Strahlungseinkopplung zwischen Faseradapter des Spektrometers und Glasfaser ist vergrößert dargestellt [aus Leuchner et al., 2005].	38
16	Quasi-monolithisches Diodenarray Multi-Channel-Spektrometer-Modul mit 1024 Pixeln der Firma Zeiss. Der spezifizierte Messbereich liegt zwischen 215 nm und 1020 nm mit einer spektralen Auflösung von 0,8 nm.	41
17	Scan (10 μ m Raster) der emittierten Strahlung einer Leuchtdiode an der Matrixposition X = 80,5 / Y = 92,17 (Interpolationsmethode: lineares Kriging). Dargestellt ist der relative Anteil der emittierten Strahlung vom Maximum.	42
18	Positionen der 25 Vertikalprofile innerhalb der Intensivmessfläche im Kranzberger Forst (Vermessung der Seilpositionen: J. Zander, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz)	43
19	Schematische Darstellung des Anteils tatsächlich eingekoppelter zu eintreffender direkter PAR im Vergleich von LI-COR Quantensensoren (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR Inc., Nebraska, USA) und sphärischen Sensoren unter verschiedenen Strahlungseinfallswinkeln des oberen Halbraums. Die kosinuskorrigierten Planarsensoren von LI-COR weisen eine Winkelabhängigkeit auf, die Kugelsensoren sind bei der Strahlungseinkopplung aus allen Raumrichtungen winkelunabhängig.	46

- 20 Verhältnis zwischen photosynthetischer Photonenflussrate (PPFR) und photosynthetischer Photonenflussdichte (PPFD), gemessen im Vergleich von sphärischen Sensoren zu LI-COR Quantensensoren (LI-190SZ Quantum Sensor, LI-COR Inc., Nebraska, USA), über dem Bestand (32 m Höhe) und am Bestandesboden bei bewölktem (OVC, 27.09.2005) und wolkenlosem (CS, 22.09.2005) Himmel. Die Unterschiede des gemessenen Photonenflusses sind insbesondere bei CS-Bedingungen v.a. bei geringer Sonnenhöhe am größten. Bei OVC-Bedingungen über dem Bestand und am Bestandesboden verhält sich das Signalverhältnis über den gesamten Tagesverlauf konstant bei Werten um 2. 49
- 21 Vertikalprofile der relativen Photonenflussrate ($PPFR_{rel}$) in der Buchen- (A, C) und Fichtenkrone (B, D) am 24.10. (CS; A, B) und 14.10.2004 (OVC; C, D) um 12:00 h MEZ vor dem Laubfall 51
- 22 Vertikalprofile der relativen Photonenflussrate ($PPFR_{rel}$) in der Buchen- (A, C) und Fichtenkrone (B, D) am 15.11. (CS; A, B) und 16.11.2004 (OVC; C, D) um 12:00 h MEZ nach dem Laubfall 52
- 23 Typisches Vertikalprofil (sechs Ebenen) der spektralen Photonenflussrate (A), der relativen spektralen Photonenflussrate (B) und der relativen spektralen Photonenextinktion (C). Das Profil wurde in der Buche am 24.10.2004 um 12:00 h MEZ bei voller Belaubung und wolkenlosem Himmel gemessen. Zum Vergleich die relativen spektralen Photonenflussraten des gleichen Vertikalprofils in unbelaubtem Zustand (D) vom 22.04.2005 12:00 h MEZ. 53
- 24 Häufigkeitsverteilungen der relativen Photonenflussrate (PFR_{rel}) in Klassen von 0,01 in zwei Spektralbereichen (PAR: 400 nm – 700 nm; NIR: 700 nm – 1000 nm) in einem Fichten- (C, D) Buchen- (A, B) Bestand bei unterschiedlichen Bewölkungsbedingungen (unbewölkt, CS: A, C; komplett bewölkt, OVC: B, D). Daten wurden vor Laubaustrieb der Buche (P1) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 22.04.2005 (CS); 18.04.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt. 55
- 25 siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). 56
- 26 siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Laubfall der Buche (P3) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 24.10.2004 (CS); 14./16./18./19.10.2004 (OVC). 57
- 27 siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden nach Laubfall der Buche (P4) am Bestandesboden (Ebene 1) erhoben. Untersuchte Tage: 15./21.-11.2004 (CS); 12./16.11.2004 (OVC). 59

28	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Austrieb der Buche (P3) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 22.04.2005 (CS); 18.04.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	60
29	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	61
30	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden vor Laubfall der Buche (P3) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 24.10.2004 (CS); 14./16./18./19.10.2004 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	62
31	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden nach Laubfall der Buche (P4) in 20 m Höhe (Ebene 4) erhoben. Untersuchte Tage: 15./21.-11.2004 (CS); 12./16.11.2004 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	63
32	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 14 m Höhe (Ebene 2) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	64
33	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 17 m Höhe (Ebene 3) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	65
34	siehe Legende in Abb. 24; Daten wurden bei voller Belaubung (P2) in 23 m Höhe (Ebene 5) erhoben. Untersuchte Tage: 15.07.2005 (CS); 11.07.2005 (OVC). Schraffierte Bereiche sind mit zehnfacher Überhöhung dargestellt.	66
35	Vertikalprofile der Mittelwerte der Photonenflussraten (A, C) und der Variationskoeffizienten (B, D) bei voller Belaubung (P2) für Buche und Fichte bei bewölkten (OVC; 11.07.2005 12:00 MEZ) und wolkenlosen (CS; 15.07.2005 12:00 MEZ) Bedingungen für den PAR- (A, B) und den NIR- Bereich (C, D)	67
36	Vertikalprofile der Mittelwerte der photosynthetischen Photonenflussraten zu verschiedenen phänologischen Phasen (P1–P4) für Buche (A, B) und Fichte (C, D) zu bewölkten (OVC; B, D) und wolkenlosen (CS; A, C) Bedingungen	68
37	Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonenflussrate in <i>Fagus sylvatica</i> L. (Varianten A, C) und <i>Picea abies</i> [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen kurz nach dem Laubaustrieb der Buche (Zeitraum: 11.05.–18.05.2005)	73

- 38 Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen bei voller Belaubung (Zeitraum: 07.07. – 15.07.2005) 74
- 39 Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen vor dem Laubfall der Buche (Zeitraum: 14.10. – 24.10.2004) . . . 75
- 40 Abhängigkeit des R/FR zur relativen photosynthetischen Photonflussrate in *Fagus sylvatica* L. (Varianten A, C) und *Picea abies* [L.] Karst. (B, D) an klaren (CS) (A, B) und bewölkten (OVC) (C, D) Tagen nach dem Laubfall der Buche (Zeitraum: 14.11. – 21.11.2004) . . . 77
- 41 Vertikalprofile der relativen Photonflussrate ($PPFR_{rel}$) während des Laubfalls der Buche 2004, gemessen um 12:00 h MEZ bei wolkenlosem (CS; A, C) und vollständig bewölktem (OVC; B, D) Himmel, betrachtet für Fichte (C, D) und Buche (A, B) 79
- 42 Tagesmittelwerte (09–15 h MEZ) von $PPFR_{rel}$ (A, B) und R/FR (C, D) im Verlauf des Laubfalls (A, C) und des Laubaustriebs (B, D) der Buche im Vergleich mit Boniturdaten (Seneszenzstufe, Austriebsstufe). Seneszens- und Austriebsdaten erhoben von Markus Löw und Rosemarie Weigt, Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen. 81
- 43 Korrelation zwischen den gemessenen Tagesmittelwerten vom R/FR und den durch Bonitur ermittelten Werten für Seneszenz- (A) bzw. Austriebsstufe (B). Dargestellt sind die Werte in drei Ebenen in der Krone (14 m, 17 m, 20 m), die Regressionsgeraden und das 95 %- Konfidenzintervall in 17 m Höhe. 82
- 44 Spektrale Photonflussraten (A) und relative spektrale Photonflussraten (B) an vier Zeitpunkten am 15.10.2004 bei wechselnden Bewölkungssituationen. In der Legende sind die absoluten Werte der $PPFR$ angegeben. 84
- 45 Relative spektrale Photonflussraten im Verlauf eines Sonnenuntergangs am 15.10.2004 bei wolkenlosen Bedingungen über dem Bestand. In der Legende ist jeweils das Verhältnis vom Blaulicht- zum Rotlichtanteil (B/R) angegeben). 85
- 46 Streuplots berechneter und gemessener diffuser Strahlung (I_H) für das gesamte Jahr 2002 und für den 26.07.2002. 93
- 47 Vergleich gemessener und simulierter Vertikalprofile der relativen photosynthetischen Photonflussraten $PPFR_{rel}$. Dargestellt sind die Mittelwerte aller einer Baumart zugeordneten gemessenen Daten pro Ebene sowie die von einem 3D-Strahlungstransportmodell simulierten Profile (Mittelwerte aus 121 Profilen über 25 m² Grundfläche der jeweiligen Baumart) unter wolkenlosen (CS; 15.07.2005 09:00 – 15:00 h MEZ) und bewölkten (OVC; 11.07.2005 09:00 – 15:00 h MEZ) Bedingungen. 98

48	Vergleich zwischen berechnetem Spektrum nach DE CASTRO [2000] und gemessenem Spektrum am 11.07.2005 in 20 m Höhe	99
49	Vergleich zwischen der gemessenen und der mit einem 3D-Strahlungstransportmodell simulierten spektralen Zusammensetzung unter wolkenlosen (CS) Bedingungen am 11.07.2005 12:00 h MEZ unterschieden nach Baumart	99
50	Vergleich gemessener R/FR - Werte und gemittelter modellierter R/FR-Profile unterschieden nach Baumart und Bewölkungssituation. Die gepunkteten Linien geben die Bereiche der Standardabweichung der Modellierung an.	100
51	Modellierte Strahlungsverтикаlprofile unter veränderten (Verdopplung bzw. Halbierung) Eingangswerten der Blattflächendichte (BFD) . . .	102
52	Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	104
53	Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	104
54	Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	105
55	Modellierte horizontale Verteilung der $PPFR_{rel}$ in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	105
56	Modellierte horizontale Verteilung des R/FR direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	106
57	Modellierte horizontale Verteilung des R/FR direkt unterhalb des Kronenbereichs in 14 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	107
58	Modellierte horizontale Verteilung des R/FR in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem wolkenlosen (CS) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	107
59	Modellierte horizontale Verteilung des R/FR in der Schattenkrone in 20 m Höhe an einem bewölkten (OVC) Tag (Interpolationsmethode: lineares Kriging)	108
60	Modellierte spektrale PFR und spektrale PFR_{rel} für den PAR- Bereich in unterschiedlichen Höhen der Buchen- und Fichtenkrone unter CS-Bedingungen	109

Tabellenverzeichnis

1	Wichtige Strahlungsgrößen	13
2	Komponenten der solaren Strahlung	14
3	Technische Eigenschaften des Multi-Channel-Spektrometer-Moduls . .	40
4	Technische Eigenschaften des Hochpräzisions-Positioniersystems . . .	40
5	Verteilung der Strahlungssensoren auf die sechs vertikalen Ebenen . .	44
6	Unter Waldbeständen ermittelte R/FR verschiedener Autoren (ergänzt nach AMMER [2000])	70
7	Spannen der im Kranzberger Forst ermittelten R/FR unter verschiedenen Bewölkungsbedingungen (OVC: bewölkt, CS: klar) während vier phänologischer Phasen	71
8	Parameterwerte, Bestimmtheitsmaße und Anzahl der Fälle der in den Abb. 37–40 und Gleichung 20 ermittelten Regressionen zwischen photosynthetisch und photomorphogenetisch aktiver Strahlung	78
9	Bestimmtheitsmaße (R^2) zwischen modellierten und gemessenen Daten und Werte der Steigungen (a) der durch den Nullpunkt gezwungenen Regressionsgeraden	97

Anhang

Eigene Publikationen

HÄBERLE, K.H., REITER, I.M., NUNN, A.J., GRUPPE, A., SIMON, U., GOSSNER, M., WERNER, H., LEUCHNER, M., HEERDT, C., FABIAN, P., MATYSSEK, R. (2003): KROCO, Freising, Germany: canopy research in a temperate mixed forest of Southern Germany. In: Basset, Y., Horlyck, V., Wright, S.J. (Hrsg.): Studying forest canopies from above: The International Canopy Crane Network. Smithsonian Tropical Research Institute and UNEP, Panama, 71-78.

KIRCHNER, M., LEUCHNER, M., BRÄUTIGAM, S., PEICHL, L., HOPPE, A., KETTRUP, A. (2001): Depositionsmessungen im ostbayerischen Grenzgebirge. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen: *Materialien Umwelt & Entwicklung Bayern* 160, München.

LEUCHNER, M., FABIAN, P., WERNER, H. (2005): Spectral multichannel monitoring of radiation within a mature mixed forest. *Plant Biol.* 7, 619-627.

LEUCHNER, M. (2000): Vergleichende Auswertung von Depositionsmessungen im bayerisch-böhmischen Grenzgebirge – Räumliche Verteilung, Trends und Bewertung der Stoffeinträge. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Physische Geographie, Kath. Univ. Eichstätt, Eichstätt.

LÖW, M., HERBINGER, K., NUNN, A.J., LEUCHNER, M., HEERDT, C., WIPFLER, P., HÄBERLE, K.H., MATYSSEK, R. (submitted): Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica*). *Trees*.

NUNN, A.J., KOZOVITS, A.R., REITER, I.M., HEERDT, C., LEUCHNER, M., LÜTZ, C., LIU, X., LÖW, M., WINKLER, J.B., GRAMS, T.E.E., HÄBERLE, K.H., WERNER, H., FABIAN, P., RENNENBERG, H., MATYSSEK, R. (2005): Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*). *Environ. Pollution* 137, 494-506.

Lebenslauf

Michael Leuchner

Dipl.-Geogr. (Univ.)



Persönliche Daten

Geburtsdatum und -ort
Familienstand

11.11.1974, Fürth
ledig

Schulbildung

1981 - 1985
1985 - 1994

Grundschule Maistraße, Fürth
Hardenberg-Gymnasium, Fürth

Hochschulstudium

November 1994 - Juli 2001

Diplomstudium der Geographie an der Katholischen Universität Eichstätt mit Schwerpunkt Physische Geographie/Geoökologie

September 1997 - Juni 1998

Auslandsstudium an der Western Washington University, Bellingham, USA

Oktober 1999 - Juni 2000

Diplomarbeit am Institut für Ökologische Chemie, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, München

Thema: Vergleichende Auswertung von Depositionsmessungen im bayerisch-böhmischen Grenzgebirge – Räumliche Verteilung, Trends und Bewertung der Stoffeinträge

Oktober 2000 - März 2001

Auslandsstudium an der Universidad de Sevilla, Spanien

Juli 2001

Diplom

seit August 2001

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ökoklimatologie, Technische Universität München

Praktika

Juni 1998 - September 1998

Freiwilliges Forschungsprojekt im Bereich Atmosphärenchemie / Nebeldeposition, Stampede Pass, USA

Mai 1999 - Juli 1999

GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Institut für Ökologische Chemie, München

Juli 1999 - Oktober 1999

Fraunhofer Institut für Atmosphärische Umweltforschung, Abteilung Umweltmesstechnik, Garmisch-Partenkirchen

August 2000 - September 2000

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

Sprachkenntnisse

Englisch, Spanisch

Fürth, den 19.12.2005