

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 153 (2002)

Heft: 2

Artikel: Ein Vergleich verschiedener Lichtmessmethoden in Buchennaturwäldern Sloweniens aus verjüngungsökologischer Sicht

Autor: Diaci, Jurij / Thormann, Jean-Jacques

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098216>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ein Vergleich verschiedener Lichtmessmethoden in Buchennaturwäldern Sloweniens aus verjüngungsökologischer Sicht

JURIJ DIACI und JEAN-JACQUES THORMANN

Keywords: Solar radiation estimation; hemispherical photography; horizontoscope; LAI-2000 PCA; instantaneous %PPFD; diffuse-site-factor; direct-site-factor. FDK 111.21 : 181 : 211 : (497.12)

Abstract: In 1999 we compared four efficient and simple methods for estimating the radiation climate in forests: hemispherical photography, horizontoscope, LAI-2000 and instantaneous measurements of percentage of above-canopy photosynthetic photon flux density (%PPFD). 64 measurements were taken 1.0 m above the ground within four gaps and under the closed canopies of two deeply shaded old-growth beech forests.

Abstract: 1999 verglichen wir vier einfache und effiziente Lichtmessmethoden im Wald (Fischaugenfotos, Horizontoskop, LAI-2000 plant canopy analyser und momentane Messungen der fotosynthetisch aktiven Strahlung PAR mittels zwei Quantum Sensoren) in zwei Buchennaturwäldern Sloweniens. In vier Bestandeslücken und unter dem geschlossenen Kronendach wurden je 64 Messungen auf einem Meter über Boden durchgeführt.

DIACI, J., THORMANN, J.-J.: Ein Vergleich verschiedener Lichtmessmethoden in Buchennaturwäldern Sloweniens aus verjüngungsökologischer Sicht (reviewed paper)

1. Einleitung

Die Sonne versorgt die Ökosysteme auf der Erde mit Energie. Deswegen zählen Messungen der Sonnenstrahlung zu den wichtigen Fundamenten walddökologischer Untersuchungen. Jeder Waldbauer muss darum die Grundlagen der Sonneneinstrahlung im Wald verstehen, weil mit den waldbaulichen Eingriffen das Lichtklima stark beeinflusst wird.

Heutzutage entwickeln sich die Methoden der Strahlungsmessung rasch. In den letzten Jahren sind mehrere Arbeiten erschienen, die einen Überblick auf diesem Gebiet geben (z.B. BRUNNER 1994, DOHRENBUSCH 1995, THORMANN 1997, COMEAU *et al.* 1998, GENDRON *et al.* 1998, DIACI 1999, LIEFFERS *et al.* 1999). Das Lichtklima im Wald weist eine grosse räumliche, zeitliche, spektrale und qualitative Variabilität auf. Um diese heterogene Ressource entsprechend zu charakterisieren, sind gewöhnlich Dauermessungen mit Quantum Sensoren für die Erfassung der fotosynthetisch aktiven Strahlung PAR mit entsprechenden Mess- und Speichergeräten nötig (EASTER & SPIES 1994, DOHRENBUSCH 1995, LIEFFERS *et al.* 1999). Die Ausrüstung mit PAR-Sensoren, Speichergeräten und entsprechender Computerunterstützung ist zwar immer einfacher zu handhaben, jedoch nur dann, wenn man sich mit ein paar wenigen Sensoren im Feld zufrieden gibt. Eine verjüngungsökologische Untersuchung verlangt aber meist langfristige Messungen gleichzeitig auf mehreren Punkten und in verschiedenen Untersuchungsflächen. Die Einrichtung solcher relativ komplizierter Messsysteme ist aus logistischen und finanziellen Gründen schwierig realisierbar (COMEAU *et al.* 1998, DIACI *et al.* 1999, LIEFFERS *et al.* 1999).

Zusätzlich ist gemäss neueren pflanzenphysiologischen Untersuchungen die Lichtqualität (das Verhältnis von hellrotem zu dunkelrotem Licht, vgl. SCHMERBER 1997) im Wald von grosser Bedeutung. Diese zu erfassen ist nochmals komplizierter und erfordert einen immensen Aufwand. Viele Fragen sind dabei noch nicht gelöst.

Bei waldbaulichen und als Teil davon in verjüngungsökologischen Untersuchungen ist es notwendig, eine repräsentative Waldfläche zu analysieren, die in der Regel relativ gross ist. Aus diesem Grund sind wir in den meisten Fällen an der langfristigen, durchschnittlichen Strahlung, z.B. über eine Vegetationsperiode, interessiert. Dafür sind Methoden, die

mit momentanen Messungen arbeiten und Schätzungen für Strahlungs-Durchschnittswerte liefern, am besten geeignet und in der waldbaulichen Forschung weit verbreitet. In den letzten Jahren haben sich vor allem folgende vier Methoden bewährt: Fischaugenfotos bzw. hemisphärische Fotos (z.B. WAGNER 1994), Horizontoskop (z.B. SCHÜTZ & BRANG 1995), LAI-2000 plant canopy analyser (WELLES & NORMAN 1991) und momentane Messung der relativen PAR-Strahlung, im Weiteren als momentane %PAR-Methode bezeichnet (PARENT & MESSIER 1996). Der enorme Fortschritt in der Computertechnik hat eine rasche Entwicklung der ersten zwei Methoden ausgelöst. Durch die Digitalisierung der Bilder ist es möglich geworden, die Auswertung zu objektivieren und zu beschleunigen.

Diese Methoden weisen vielfach eine geringere Genauigkeit auf als Dauermessungen mit Quantum Sensoren. Die Resultate liegen aber meist noch im akzeptierten Toleranzbereich für verjüngungsökologische Untersuchungen. Viele Autoren haben eine enge Korrelation zwischen prozentualen PAR-Daten aus Dauermessungen mit Quantum Sensoren und Schätzungen entsprechender Strahlungswerte anhand der oben erwähnten momentanen Methoden nachgewiesen (z.B. RICH *et al.* 1993, EASTER & SPIES 1994, MESSIER & PUTTONEN 1995, PARENT & MESSIER 1996, COMEAU *et al.* 1998, GENDRON *et al.* 1998, MACHADO & REICH 1999). Dabei ist es z.B. möglich, die Resultate von hemisphärischen Fotos in Kombination mit nur wenigen punktuellen PAR-Sensordaten noch deutlich zu verbessern (RICH *et al.* 1993, WAGNER 1996).

Die oben erwähnten Methoden wurden schon oft erfolgreich in den verjüngungsökologischen Untersuchungen angewandt, besonders Fischaugenfotos und Horizontoskop, welche die einfallende Strahlung in eine direkte und diffuse Strahlungskomponente unterteilen (z.B. FREHNER 1989, CANHAM *et al.* 1994, BRANG 1998, DIACI 2001). Diese Unterteilung ist besonders wichtig bei den Untersuchungen der Verjüngung in Lücken, weil die Klimaverhältnisse in den Lücken stark von der Nord-Süd-Asymmetrie der Lichtstrahlung geprägt werden (vgl. POULSON & PLATT 1989).

Die Aufnahme und Auswertung der hemisphärischen Fotos ist anspruchsvoll und zeitraubend. Aus diesem Grund wäre es bei verjüngungsökologischen Untersuchungen angebracht, einen Teil der Fotos mit der schnellsten und billigsten %PAR-

Methode zu ersetzen. Jedoch nur dann, wenn es keine grossen Unterschiede zwischen diesen Methoden im unteren Strahlungsbereich gibt. Mit den hemisphärischen Fotos würde man dann vor allem die Teile der Lücken analysieren, wo die Nord-Süd-Asymmetrie der Lichtstrahlung stark betont ist.

Ein Vergleich der Strahlungsschätzung anhand Fischaugenfotos, Horizontoskop und LAI-PCA-Methode in subalpinen Fichtenwäldern bei Sedrun in der Schweiz bei mittleren Strahlungsverhältnissen von 10 bis 25 relativen Strahlungsprozenten lieferte sehr gute Ergebnisse (THORMANN 1997). Es wurde schon damals auf die Beschränkung der Horizontoskop-Methode auf klar abgegrenzte Lücken hingewiesen.

In waldbaulichen Untersuchungen befassen wir uns oft mit knappen Lichtverhältnissen und inhomogenen Baumschichten, z.B. bei der Analyse der Verjüngungsprozesse in Plenterwäldern und Urwäldern oder bei der Analyse der Sukzessionsdynamik. Dabei ist zu erwarten, dass die Bearbeitung der hemisphärischen Fotos (vgl. MACHADO & REICH 1999) sowie die Aufnahmen der Horizontogramme mit dem Horizontoskop (vgl. THORMANN 1997) ungenauer wird, weil die Lückengrenzen nur schwer zu definieren sind.

Die Entwicklung der Keimlinge und des Anwuchses ist von der relativen durchgelassenen Strahlung unter der Bodenvegetationsdecke und dessen Qualität abhängig. Diese Strahlungskomponente wird besonders wichtig in Beständen mit natürlicherweise üppiger und geschlossener Vegetationsschicht (vgl. OTT 1989) oder in Beständen mit gestörten Bodenbildungsprozessen, z.B. in künstlichen Fichtenbeständen (vgl. DIACI 2001).

Die Hauptziele unserer Untersuchung waren folgende:

1. Ein Vergleich von vier momentanen Methoden zur Schätzung der langfristigen, diffusen Lichtverhältnisse unter anspruchsvollen Bedingungen (im unteren Strahlungsbereich, inhomogene Baumschicht, kleine diffuse überlappende Lücken).
2. Ein Vergleich der relativen diffusen durchgelassenen Strahlung unter der Bodenvegetation mit der LAI-2000 PCA-Methode und der momentanen %PAR-Methode.
3. Darstellung praktischer Erfahrungen bei den Aufnahmen mit den vier Methoden.

Auf einen zusätzlichen Methodenvergleich der Erfassung des direkten Lichtes (Anzahl potenzielle Sonnenstunden pro Monat und Tag) wurde mangels genügender Daten verzichtet. Für die Erfassung des direkten Lichtes ist die Fischaugenfoto-Methode kaum umstritten (vgl. THORMANN 1997). Mit dem Horizontoskop gelingt dies bei sorgfältiger Arbeitsweise auch zufriedenstellend.

Die direkte Lichtkomponente spielt insbesondere in den obersten Lagen des Bergwaldes, wo die Wärme meist zum Minimalfaktor wird, eine entscheidende Rolle (vgl. z.B. FREHNER 2001).

Die Lichtqualität gemäss SCHMERBER (1997) konnte in dieser Untersuchung mangels geeigneter Erfassungsgeräte ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

2. Aufnahmeflächen

Die Aufnahmen wurden in den Buchenwaldreservaten Sentjosi vrh (46°16' N, 14°55' E) und Tolsti vrh (46°17' N, 14°56' E) in einer Höhenlage von 1100 m ü.M. im Krasica Gebirge in Slowenien durchgeführt. Der Standort entspricht einem *Abieti-Fagetum dinaricum* – Subass. *aceretosum* (WRABER 1963).

Die oberste Baumschicht besteht aus gut bekronen alten Buchen mit einzelnen Weisstannen, Fichten, Bergahornen und Bergulmen. In der unteren Baumschicht befinden sich einzelne Tannen und Fichten und Bergahorne im Jungwuchs. Die

Nadelbäume wurden vor etwa achtzig Jahren plenterartig genutzt. Seitdem gab es nur noch Zwangsnutzungen. Der Vorrat betrug zur Zeit der Untersuchung etwa 450 m³/ha bei einer Oberhöhe von rund 40 m.

3. Methoden

In beiden Wäldern wurden insgesamt in drei kleineren (etwa 0,03 ha) und einer mittleren (0,06 ha) Bestandeslücke je 13 Aufnahmepunkte gemäss *Abbildung 1* angeordnet. Unter dem geschlossenen Bestand waren es je zwei mal sechs Aufnahmepunkte. Die Aufnahmen erfolgten mit den vier in den folgenden Unterkapiteln kurz vorgestellten Methoden oberhalb der mit Pflöcken markierten Messpunkte normiert auf 1,0 m Höhe. Im Juli 1999 wurden die Messungen der DIFN- und %PPFD-Werte mit dem LAI-2000 PCA (vgl. Kap. 3.3 und 3.4) bei mehr oder weniger einheitlichen Verhältnissen abends nach Sonnenuntergang durchgeführt. Ausserdem wurde eine zusätzliche Messung nach dieser Methode unter der Bodenvegetation auf dem Waldboden pro Messpunkt erhoben. Im selben Monat wurden die Aufnahmen mit dem fixierten Horizontoskop (HDIF%-Werte) durchgeführt (vgl. Kap.3.2). Auf Grund der schwierigen Verhältnisse (viele diffuse Kronendachlücken) wurde viel Zeit für die Anfertigung der Horizontogramme benötigt. Darum wurden die meisten Horizontogramme tagsüber bei nicht immer idealen Verhältnissen (teilweise bedecktem Himmel) aufgezeichnet. Die Fischaugenfotos (FDIF%-Werte) wurden im Juli 2000 abends nach Sonnenuntergang aufgenommen.

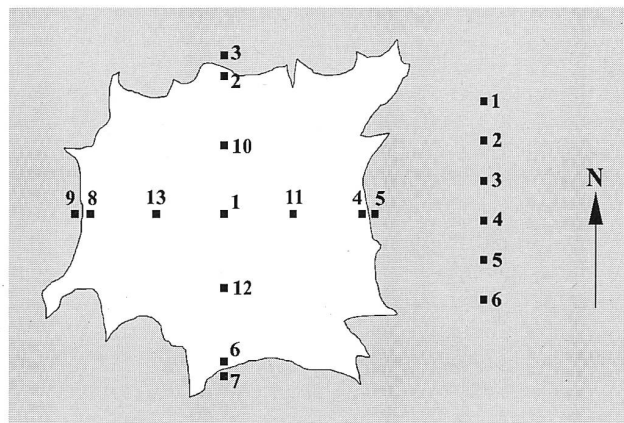


Abbildung 1: Anordnung der Aufnahmeflächen in einer Bestandeslücke (links) und unter dem geschlossenen Bestand (rechts).

Figure 1: Distribution of areas investigated in a gap (left) and under closed canopy (right).

3.1 Fischaugenfotos

Die älteste der vier angewandten Methoden entstand durch die Entwicklung eines extremen Weitwinkelobjektives (Hill 1924 in: EVANS & COOMBE 1959), welches zuerst für die Beobachtung der Bewölkung angewandt wurde. EVANS und COOMBE (1959) haben später die Methode für die Strahlungsschätzung entwickelt. Mit dem Fischaugenobjektiv wird bei genauer Horizontierung die ganze Hemisphäre vom Zenit bis zum Horizont erfasst. Die aufgenommenen Fotos sind kreisrund und stellen eine Projektion der Umgebung bis zu einem Gesichtswinkel von 180° dar (*Abbildung 2a*).

Die Methode wurde schon mehrmals eingehend beschrieben (s. z.B. ANDERSON 1964, von LÜPKE 1982) und seit den Sechzigerjahren weiter durch die Anwendung der computerunterstützten Bildauswertung (s. MADGWICK & BRUMFIELD 1969,

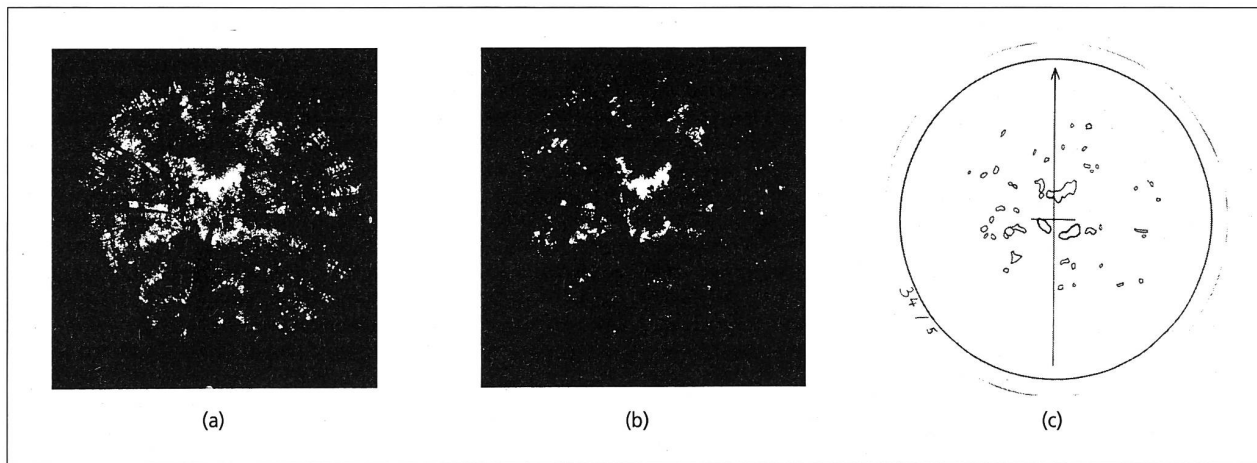


Abbildung 2: (a) Fischaugenfoto-Originalbild, (b) Fischaugenfoto nach der Bearbeitung – Schwarzweiss-Pixelbild (FDIF% = 5,9%) und (c) Horizontogramm (HDIF% = 7,1%) vom gleichen Aufnahmepunkt 34/5.¹

Figure 2: (a) Hemispherical photographs – original picture, (b) hemispherical photographs after treatment – b/w pixel picture (FDIF% = 5.9%) and (c) horizontogram (HDIF% = 7.1%) from the same vantage point 34/5.

DUCREY 1975a,b, GREIS & KELLOMÄKI 1981, CHAZDON & FIELD 1987, DOHRENBUSCH 1989, BRUNNER 1994, WAGNER 1994, GENDRON *et al.* 1998) um vieles verbessert. Sie ist jedoch leider bis heute nicht standardisiert. Es sind bei der Bildauswertung immer noch objektive Entscheide zu treffen, die das Resultat stark beeinflussen können. Ein zeitgemässes System für die computerunterstützte Bildauswertung von Fischaugenfotos besteht aus einer Kamera mit einem Fischaugenobjektiv, einem Film-Scanner, einem Bildverarbeitungsprogramm (z.B. Adobe® Photoshop®) und einem Programm für die Auswertung der Fischaugenfotos (z.B. Bioscan Optimas [WAGNER 1996], hemIMAGE², HemiView³, WinSCANOPY⁴, Canopy [RICH 1989 in: EASTER & SPIES 1994], GLA [FRAZER *et al.* 1999]). Beim Einsatz einer Digitalkamera (z.B. Nikon 990 mit Fischaugenkonverter) fällt der Scanner weg.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Sigma 8 mm, f/4-Objektiv auf einer Nikon F50 Kamera verwendet. Das Objektiv wurde in Anhalt an EVANS *et al.* (1975), HERBERT (1986) und WAGNER (1994) kalibriert (DIACI & KOLAR 2000). Für die Aufnahmen wurden Schwarzweissfilme der Firma Ilford PAN 400 (ISO 400) und ein Neutralfilter verwendet. Der Fotoapparat wurde auf einem Stativ fixiert, horizontalisiert und anhand eines externen Kompasses in der Längsachse des Filmes nach Norden orientiert.

Es erfolgten drei Aufnahmen pro Messpunkt. Zuerst wurde für die extern gemessene direkte Himmelsstrahlung eine Kombination der Blenden und Verschlusszeit ausgewählt, welche die längste Belichtung des Films ermöglicht. Damit wurde sichergestellt, dass die LED-Lämpchen, welche die Himmelsrichtung anzeigen und den Bildrand markieren, auf dem Film sichtbar wurden (z.B. 5,6/100). Das zweite Foto wurde mit einer Korrektur der Blende um eine Blendenstufe nach unten aufgenommen (z.B. 5,6/100 → 4/100) und das dritte Foto mit der Korrektur der Blende nach oben (z.B. 5,6/100 → 8/100). Für die Weiterverarbeitung wurde in der Regel das dritte Foto genommen, bei ungünstigen Lichtverhältnissen manchmal auch das erste. Das zweite Foto wurde für die Feineinstellung des Bildes anhand der sichtbaren LED-Leuchten verwendet.

¹ Foto (2b) und Horizontogramm (2c) sind nicht direkt vergleichbar, da es sich um verschiedene Projektionen handelt.

² BRUNNER, A. (1998): Hemispherical photography and image analysis with hemIMAGE and Adobe Photoshop (unveröffentlicht).

³ Delta-T devices (1999), <http://www.delta-t.co.uk>.

⁴ Regent instruments (1999), WinSCANOPY software for canopy analysis, <http://www.regent.qc.ca/>

Die Fotos wurden anschliessend mit einem Nikon 35 mm Filmscanner LS-30 digitalisiert (2100 dpi) und mit dem Adobe® Photoshop® mit der Festlegung von einem, wenn nötig bei unterschiedlich hellem Himmel auch von zwei Grenzgrauwerten zu einem reinen Schwarzweissbild (vgl. *Abbildung 2b*) bearbeitet. Dieser Bearbeitungsschritt ist rein subjektiv und darum sehr problematisch. Bei unsorgfältiger Festlegung des Grenzwertes können gemäss KREBS (2001) Abweichungen der Resultate von bis zu 60% entstehen. Die weitere Auswertung erfolgte mit dem Programm hemIMAGE⁵ mit folgenden Eingangsgrössen: Anteil des diffusen Lichtes oberhalb des Kronendaches = 50%, Himmelsstrahlungsverteilungs-Parameter = SOC (Standard Overcast Sky). Die auf diese Weise gewonnene relative diffuse Strahlung, im Weiteren als FDIF% bezeichnet, wurde mit den Resultaten der drei anderen Methoden verglichen.

3.2 Horizontoskop

Das Horizontoskop wurde schon verschiedentlich beschrieben (TONNE 1954, FREHNER 1989, SCHÜTZ & BRANG 1995). Es funktioniert nach folgendem einfachen Prinzip: Auf der aus durchsichtigem Kunststoff gefertigten gewölbten Fläche spiegelt sich beim Betrachten der Fläche senkrecht von oben die gesamte Umgebung und dadurch auch die Himmelsfläche und die Kronenprojektion des Umgebungsbestandes. Die Horizontalprojektion der Himmelsfläche kann von unten auf ein unter der gewölbten Fläche eingespanntes Transparentpapier aufzeichnet werden (vgl. *Abbildung 2c*).

Die ersten Probemessungen waren besonders im Bereich der relativen diffusen Strahlung nicht zufriedenstellend (DIACI 1997). Aus diesem Grund wurde eine Vorrichtung entwickelt (*Abbildung 3*), die eine relativ exakte Aufzeichnung der Situation auf ein Transparentpapier auf der unteren Seite des Horizontoskops ermöglicht. Das Auflagegestell wird auf einem Stativ fixiert, wodurch eine grössere Aufzeichnungsgenauigkeit erreicht wird.

In dieser Untersuchung wurden die Aufzeichnungen oberhalb derselben Punkte wie mit den anderen Methoden im Wald aufgenommen und anschliessend von Hand ausgezählt. Dabei wurde die Originalvorlage von TONNE (1954) benutzt. Die auf diese Weise erhaltene relative diffuse Strahlung wird im Folgenden als HDIF% bezeichnet.

⁵ BRUNNER, A. (1998): Hemispherical photography and image analysis with hemIMAGE and Adobe Photoshop (unveröffentlicht).

3.3 LAI-2000 plant canopy analyser (PCA)

Der LAI-2000 PCA (LI-COR 1992) wurde zur indirekten Schätzung des Blattflächenindex LAI für die Landwirtschaft entwickelt. Auf dem Prinzip von ANDERSON (1964) beruhend, wird die diffuse Strahlung unter dem Schirm mit den diffusen Lichtverhältnissen über dem Kronendach verknüpft. Mittels eines Poisson-Modells gemäss dem Beer-Lambert Gesetz (vgl. THORMANN 1997) können daraus Attribute zur Kronendachstruktur (z.B. der Blattflächenindex LAI und der mittlere Blattstellungswinkel MTA) und zur diffusen Strahlung (Anteil der Kronendachlücken DIFN) gewonnen werden. Das Gerät besteht aus einer Kontrolleinheit und einer hemisphärischen Sensor-Optik (Abbildung 5), in der ein Abbild auf fünf konzentrisch angeordneten Detektorringen mit den mittleren Zenitwinkeln von 7°, 23°, 38°, 53° und 68° projiziert wird (Abbildung 4). Zur Minimierung der an den Blättern reflektierten Strahlung, begrenzt ein optischer Filter den erfassten Strahlungsbereich auf unter 490 nm. Dies ergibt ein Schwarzweissbild von Blattmasse und Himmel.

In dieser Untersuchung sind nur die Attribute des diffusen Lichtes von Interesse. Der DIFN (diffuse non-interceptance) ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, mit der die diffuse Strahlung von der oberen Hemisphäre ungestört durch das Kronendach auf einen bestimmten Ort gelangt. Je nach Eingangsgrößen geht das Modell von folgenden Bedingungen aus:

- In der Variablen DIFN ist der Himmel gleichmässig hell (UOC, Uniform Overcast Sky).
- In der Variablen DIFN' ist die Beleuchtungsstärke im Zenit dreimal so gross wie am Horizont (SOC, Standard Overcast Sky).
- Je nach Berücksichtigung und Gewichtung der einzelnen Sensorringe können Randeinflüsse minimiert werden. Im vorliegenden Fall wurden alle fünf Sensorringe berücksichtigt.

Die Schätzung des DIFN in dieser Untersuchung bestand aus zwei verschiedenen Messungen (A und B). Die B-Messung erfolgte im Bestand unter Schirm, die Referenzmessung (A) simultan dazu in einer nahe gelegenen Lichtung mit einem zweiten Gerät in «Remote Mode». Mit Hilfe der Software (C2000 von Li-Cor) wurden die zwei möglichst zeitgleichen Messungen zusammengeführt und DIFN als relativer Schätzwert berechnet.

3.4 Die momentane %PAR-Methode

Neben dem LAI-2000 PCA-Sensor wurde zusätzlich je ein PAR-Quantum Sensor (Li-1905A von Li-Cor) montiert und direkt an die Kontrolleinheit des LAI-2000-Instrumentes angeschlossen. Dies ermöglicht gleichzeitig die Schätzung einer relativen Photonenflussdichte (PPFD, Photosynthetically Photon Flux

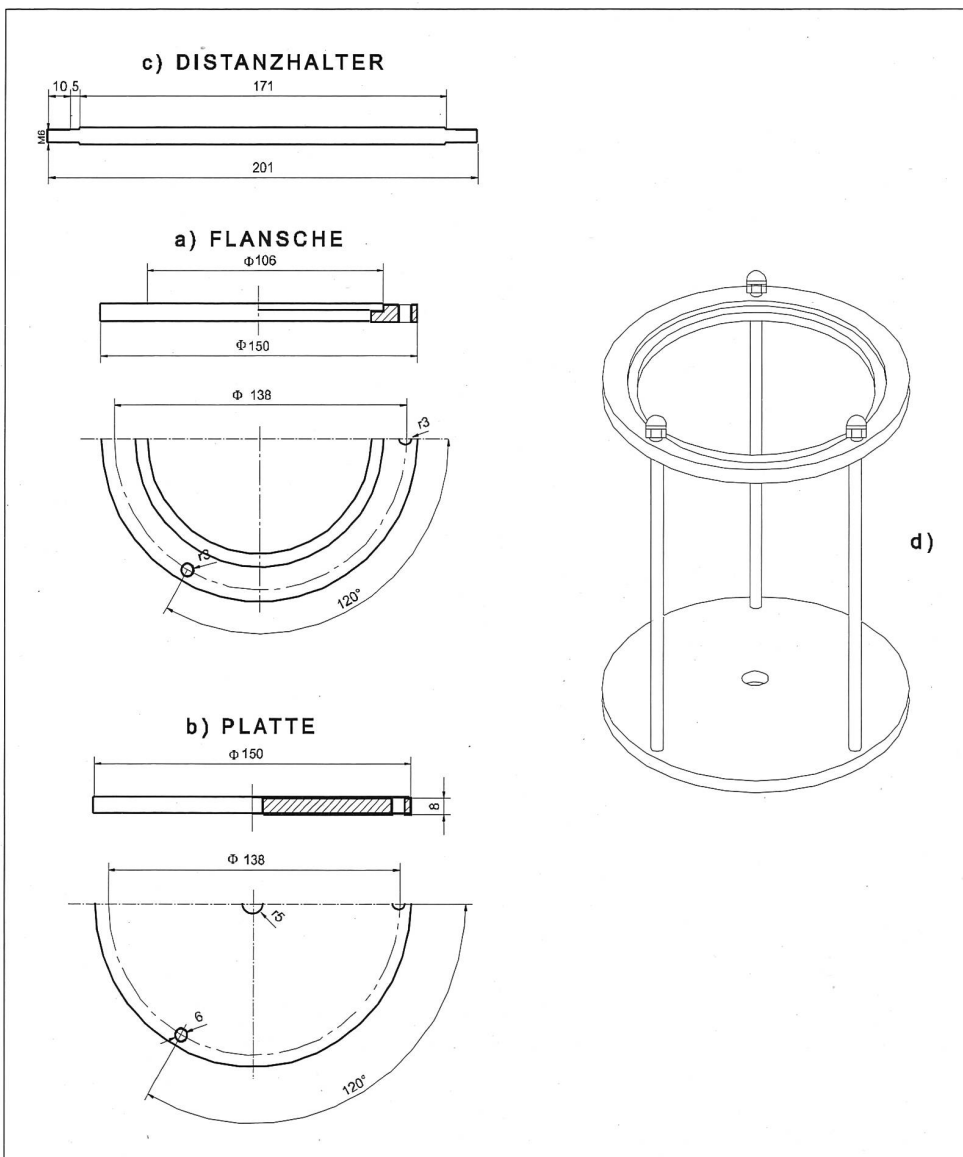


Abbildung 3: a) Plan der Flansche im oberen Teil des Horizontoskop-Gestells. Die Flansche hat eine Nut, in welche das Horizontoskop mit dem Pauspapier (Horizontogramm) gelegt wird. Die Öffnung in der Mitte ermöglicht die Aufzeichnung des unbedeckten Himmelteils auf ein Blatt Pauspapier von unten her. b) Plan der runden Platte für den unteren Teil des Horizontoskop-Gestells. c) Plan des Distanzhalters zwischen der Flansche oben und der runden Platte auf dem unteren Teil des Horizontoskop-Gestells. d) Skizze des zusammengesetzten Horizontoskop-Gestells.

Figure 3: a) Plan of the flange on the upper part of the horizontoscope support. The flange has a groove into which the horizontoscope with tracing paper (horizontogramme) is fixed. Under clear skies the aperture in the middle enables an operator to trace on to the paper from underneath. b) Plan of the plate for the bottom of the horizontoscope support. c) Plan of a middle piece of the horizontoscope support (1 of 3) to join the flange at the top to the plate at the bottom. d) Diagram of the assembled horizontoscope support.

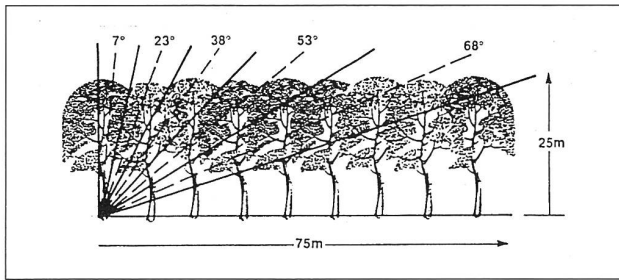


Abbildung 4: Erfassungsbereich des LAI-2000 PCA-Sensors (aus CHASON *et al.* 1991, verändert).

Figure 4: Area measured by the LAI-2000 PCA sensor (by CHASON *et al.* 1991, adapted).

Density) im fotosynthetisch aktiven Strahlungsbereich (400 bis 700 nm) nach der Methode von PARENT und MESSIER (1996), im Folgenden %PPFD genannt. Die Messbedingungen waren dieselben wie beim LAI-PCA, da die Messungen gleichzeitig mit dem LAI durchgeführt wurden.

3.5 Statistische Auswertung

Für die allgemeine Analyse der diffusen Strahlung wurden die DIFN-Werte der LAI PCA-Methode verwendet. Die Methode wurde schon oft mit langfristigen Messungen von PAR verglichen (z.B. COMEAU *et al.* 1998, GENDRON *et al.* 1998, MACHADO & REICH 1999). Dabei ergaben sich immer recht gute Resultate. Bei der Fischaugenfoto-Methode ergaben sich jedoch bei MACHADO und REICH (1999) unsichere Resultate im unteren Strahlungsbereich (<6% PPFD) im Vergleich zu langzeitlichen Messreihen. Aus diesem Grund haben wir die Fischaugenfotos als Referenzmethode nicht in Betracht gezogen.

Die Beziehungen zwischen den Messungen der vier verschiedenen Methoden wurden mit Regressionsanalysen ausgewertet. Aus den oben erwähnten Gründen wurden die DIFN-Werte als abhängige Variable in der Regressionsanalyse ausgewählt. Wir sind uns klar, dass die DIFN-Werte die Dauermessungen mit Quantum Sensoren als Referenzwerte nicht ersetzen können. Die Regressionsanalyse wurde in dieser Untersuchung nur als Methode für die Beschreibung linearer Zusammenhänge zwischen Variablen angewandt und nicht als Methode zur Überprüfung der Abhängigkeit zwischen abhängiger und unabhängiger Variablen. Die Bewertung der Messfehler für einzelne Messungen überschreitet die Ziele dieser Arbeit.

Die Normalverteilung der Daten und die Homogenität der Varianzen waren in den Grenzbereichen nicht vollständig gegeben. Aus diesen Gründen und weil es sich um Prozentwerte handelt, wurden die Beziehungen zwischen den einzelnen Messungen zusätzlich mit dem Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman überprüft.

Die Unterschiede der Mittelwerte der Messungen wurden zusätzlich mit nicht parametrischen Methoden getestet.

4. Ergebnisse

Die Messungen des DIFN auf einem Meter Höhe zeigen ein Intervall von 0,7% bis 9,6%, wobei 75% der Messungen in den Bereich unter 4,5% fallen. Die höchsten Werte wurden im Zentrum der mittleren Lücke gemessen (Abbildung 8). Die niedrigsten Mittelwerte für die relative diffuse Sonnenstrahlung wurden mit dem LAI-2000-Modell DIFN' (Standard Overcast Sky) geschätzt, gefolgt vom LAI-2000-Modell DIFN (Uniform Overcast Sky), der momentanen %PAR-Methode (%PPFD) und den Fischaugenfotos (FDIF%). Mit dem Horizontoskop (HDIF%), teilweise von der direkten Strahlung

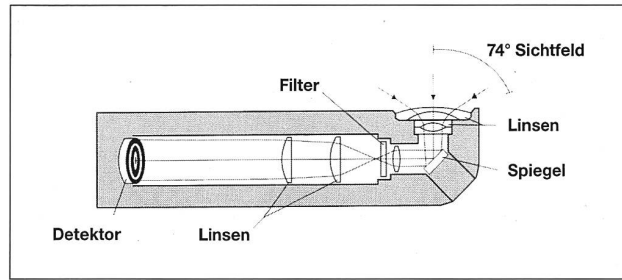


Abbildung 5: Optischer Sensor (LI-COR 1992, verändert).

Figure 5: Optical sensor (LI-COR 1992, adapted).

beeinflusst, wurden höhere Werte geschätzt (Tabelle 1). Die Unterschiede der Mittelwerte der Messreihen sind statistisch gesichert (Friedman ANOVA (N = 64, df = 4) Chi Sqr. = 190,29, p < 0,000).

Tabelle 1: Mittelwerte und Streuung der Aufnahmen.

Table 1: Average values and distribution of the exposures.

Methode	N	Arithmetisches Mittel	Median	Standardabweichung
DIFN'	64	3,33	3,15	1,5
DIFN	64	3,52	3,20	1,6
%PPFD	64	3,77	3,58	1,8
HDIF%	64	6,01	5,60	2,9
FDIF%	64	4,67	4,44	1,3

DIFN'	... LAI-2000-Modell DIFN' (Standard Overcast Sky)
DIFN	... LAI-2000-Modell DIFN (Uniform Overcast Sky)
%PPFD	... momentane %PAR-Methode
HDIF%	... Horizontoskop
FDIF%	... Fischaugenfoto-Methode

Alle drei Methoden zeigen einen linearen Zusammenhang mit den DIFN-Werten (Abbildung 6). Der stärkste Zusammenhang wurde zwischen DIFN- und FDIF%-Werten der Fischaugenfotos gewonnen ($r^2 = 0,96$), gefolgt von den %PPFD-Werten der momentanen %PAR-Methode ($r^2 = 0,90$) und den HDIF%-Werten vom Horizontoskop ($r^2 = 0,83$). Der Achsenabschnitt a und der Regressionskoeffizient b sind bei der Fischaugenfoto-Methode und dem Horizontoskop signifikant unterschiedlich von 0 bzw. von 1 (Tabelle 2). Aus dem Verlauf der Regressionsgeraden (Abbildung 6b) ist ersichtlich, dass die FDIF%-Werte eine Überschätzung der DIFN-Werte im unteren Strahlungsbereich (d.h. unter rund 6%) aufweisen. Diese Überschätzung steigt bei abnehmenden DIFN-Werten. Die HDIF%-Werte weisen eine Überschätzung der DIFN-Werte im Strahlungsbereich über etwa 2% auf. Diese Überschätzung steigt bei zunehmenden DIFN-Werten (Abbildung 6c). Die beste Übereinstimmung der Geraden ergibt sich zwischen den DIFN- und %PPFD-Werten (Abbildung 6b) mit einer nicht signifikanten Abweichung a von der 1:1 Linie und einen Regressionskoeffizient b von 0,881 (Tabelle 2).

Die Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen den Lichtschätzungen der verschiedenen Methoden zeigen signifikante Abhängigkeiten und sind im Einklang mit den parametrischen Methoden (Tabelle 3). Die stärksten Zusammenhänge ergeben sich zwischen DIFN- und FDIF%-Werten sowie DIFN'- und %PPFD-Werten ($r = 0,98$), gefolgt von DIFN- und DIFN'-Werten ($r = 0,97$). Zwischen HDIF%- und %PPFD-Werten ($r = 0,77$) bzw. DIFN'-Werten ($r = 0,81$) ergeben sich wesentlich schwächere Zusammenhänge.

Eine Abhängigkeit zwischen HDIF%-Werten und FDIF%- bzw. DIFN-Werten ergibt sich relativ gut. Wir haben besonders hohe Abweichungen der HDIF%- von DIFN-Werten unter dem geschlossenen Bestand mit kleinen überlappenden Kronen-

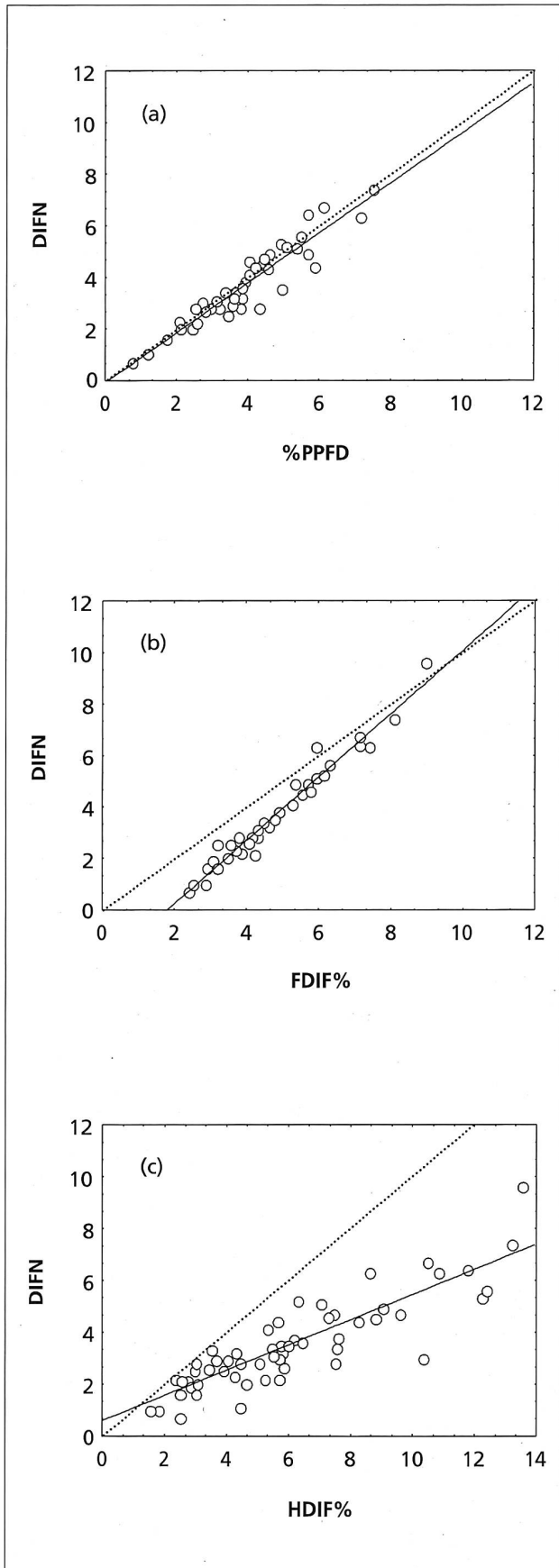


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der relativen diffusen Strahlung aufgenommen mit LAI-2000 PCA (DIFN) und mit (a) der momentanen %PAR-Methode (%PPFD), (b) den Fischaugenfotos (FDIF%) und (c) dem Horizontoskop (HDIF%). Die punktierte Linie repräsentiert die 1:1 Gerade.

Figure 6: Relationship between the relatively diffuse radiation taken with a LAI-2000 PCA (DIFN) and with (a) the instantaneous %PAR-Method (%PPFD) (b) the hemispherical photographs (FDIF%), and (c) the horizonscope (HDIF%). The dotted line shows the 1:1 gradient.

Tabelle 2: Aufstellung der Koeffizienten der Linearen Regression zwischen den DIFN-Werten der LAI-2000-Methode als abhängige Variable Y und %PPFD- (momentane %PAR-Methode), FDIF%- (Fischaugenfoto) und HDIF%-Werten (Horizontoskop) als unabhängige Variable (X) und Bestimmtheitsmass (r^2).

Table 2: List of coefficients of the linear regression between DIFN values of the LAI-2000 method as dependent variable Y and %PPFD-instantaneous %PAR method), FDIF% (hemispherical photographs) and HDIF% values (horizonscope) as independent variable (X) and exactitude (r^2).

X	Achsenabschnitt (a)	Regressionskoeffizient (b)	Bestimmtheitsmass (r^2)	Anzahl Werte (N)
%PPFD	0,201	0,881***	0,90***	64
HDIF%	0,591*	0,487***	0,83***	64
FDIF%	-2,224***	1,230***	0,96***	64

* ... Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,05
 ** ... Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,01
 *** ... Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,001

Tabelle 3: Die Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen den Lichtschätzungen der verschiedenen Methoden: DIFN- und DIFN'-Werte des LAI-2000 PCA, %PPFD-Werte der momentanen %PAR-Methode, FDIF%-Werte der Fischaugenfoto-Methode und HDIF%-Werte des Horizontoskops.

Table 3: The ranking correlation-coefficient after Spearman between the radiation evaluation of the various methods: DIFN and DIFN' values of a LAI-2000 PCA, %PPFD values of the instantaneous %PAR method, FDIF% value of the hemispherical photograph method and HDIF% values of the horizonscope.

	DIFN	DIFN'	%PPFD	HDIF%	N
DIFN'	0,97				64
%PPFD	0,94	0,98			64
HDIF%	0,86	0,81	0,77		64
FDIF%	0,98	0,95	0,92	0,83	64

Alle Korrelationen sind signifikant mit der Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,001.

Tabelle 4: Mittelwerte und Streuung der Aufnahmen unterhalb der Bodenvegetation.

Table 4: Average values and distribution of the exposures underneath the soil vegetation.

Methode	N	Arithmetisches Mittel	Median	Standardabweichung
DIFNV'	64	1,33	1,15	0,70
DIFNV	64	1,40	1,25	0,77
%PPFDV	64	1,54	1,35	0,70

DIFNV' ... LAI-2000-Modell DIFN' (Standard Overcast Sky)
 DIFNV ... LAI-2000-Modell DIFN (Uniform Overcast Sky)
 %PPFDV ... momentane %PAR-Methode

Tabelle 5: Die Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman zwischen den Lichtschätzungen der verschiedenen Methoden: DIFNV- und DIFNV'-Werte des LAI-2000 PCA, %PPFDV-Werte der momentanen %PAR-Methode.

Table 5: The ranking correlation-coefficient after Spearman between the radiation evaluation of the various methods: DIFNV and DIFNV' values of a LAI-2000 PCA, %PPFDV values of the instantaneous %PAR method.

	DIFNV	DIFNV'	N
DIFNV'	0,99		64
%PPFDV	0,56	0,56	64

Alle Korrelationen sind signifikant mit der Irrtumswahrscheinlichkeit < 0,001

DIFNV' ... LAI-2000-Modell DIFN' (Standard Overcast Sky)
 DIFNV ... LAI-2000-Modell DIFN (Uniform Overcast Sky)
 %PPFDV ... momentane %PAR-Methode

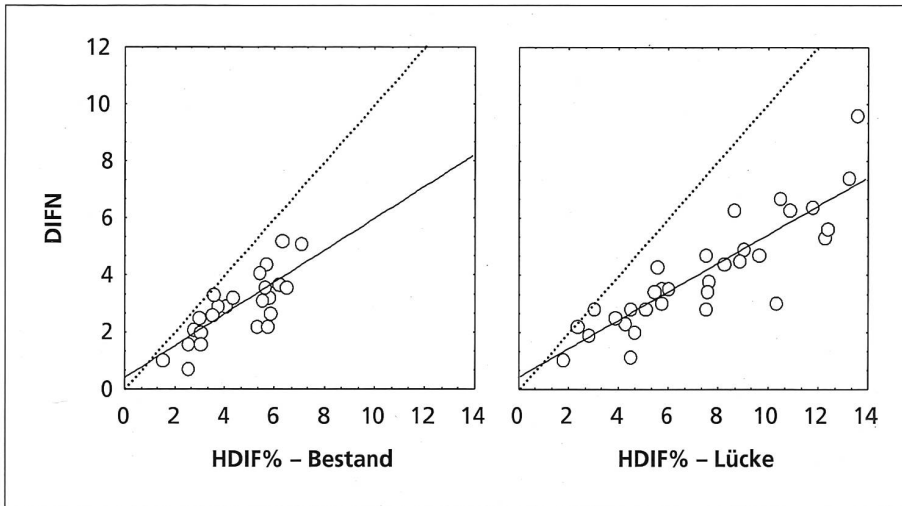


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen der relativen diffusen Strahlung aufgenommen mit LAI-2000 PCA (DIFN) und mit dem stabilen Horizontoskop (HDIF%) getrennt nach Bestand und Lücke.

Figure 7: Relationship between the relatively diffuse radiation taken with a LAI-2000 PCA (DIFN) and with the stable horizonoscope (HDIF%), separated according to stand and gap.

dachlücken erwartet. Deswegen wurde geprüft, ob die Korrelationen zwischen DIFN und HDIF% getrennt in klar begrenzten Lücken und unter dem geschlossenen Bestand (beide Bestände und die Punkte 3, 5, 7 und 9 unter den Kronen, vgl. *Abbildung 1*) unterschiedlich sind. Die Streuung der Werte unter dem Bestand (N = 28) ist nicht signifikant höher als die Streuung in den Lücken (N = 36). Beide Achsenabschnitte sind nicht signifikant unterschiedlich von 0 und die Regressionskoeffizienten unter sich sind nicht signifikant unterschiedlich ($F = 0,286$, $df = 1,60$, $p < 0,594$, vgl. *Abbildung 7*). Die Resultate lehnen die obere Vermutung ab.

4.1 Relative diffuse Sonnenstrahlung unter der Bodenvegetation

Die Messungen der DIFNV-Werte unterhalb der Bodenvegetation erstreckten sich über ein Intervall von 0,5% bis 4,1% (*Abbildung 8*). Die Mehrheit (75%) der Messungen liegt im Bereich unter 1,8%. Dabei werden die niedrigsten Werte in den alten kleinen und mittleren Lücken gemessen und nicht unter dem geschlossenen Bestand, was auf die üppige Entwicklung der Bodenvegetation in den alten Lücken hindeutet. Die DIFNV-Werte in den neuen Lücken sind mit denjenigen unter dem geschlossenen Bestand vergleichbar.

Die niedrigsten Werte für die relative diffuse Strahlung unter der Bodenvegetation wurden wieder mit den LAI-2000

PCA-Modell DIFNV' aufgenommen, gefolgt von DIFNV und %PPFDV (*Tabelle 4*). Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten von DIFNV und %PPFDV sind statistisch gesichert (Friedman ANOVA, Chi Squ. (N = 64, $df = 1$) = 6,25, $p < 0,012$).

Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman zwischen den DIFNV- und den DIFNV'-Werten ist höher als bei den Messungen auf einem Meter Höhe oberhalb der Bodenvegetation (*Tabelle 5*). Die Rangkorrelationskoeffizienten zwischen DIFNV bzw. DIFNV' und %PPFD sind jedoch wesentlich niedriger als auf einem Meter Höhe (vgl. *Tabelle 3*). Um zu überprüfen, ob eine üppige Bodenvegetation die Zusammenhänge zwischen den Messungen beeinflusst, wurden die Aufnahmen getrennt in den alten Lücken mit schon geschlossener Bodenvegetation und in den neuen Lücken und im Bestand mit spärlich entwickelter Bodenvegetation analysiert (*Abbildung 9*).

Die Abhängigkeit zwischen DIFNV und %PPFD in den alten Lücken ist äusserst schwach und nicht signifikant (N = 28, $p < 0,523$) mit einem Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman von 0,13. Die Abhängigkeit für die neuen Lücken und im Bestand ist wesentlich stärker und signifikant (N = 38, $p < 0,000$). Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman beträgt 0,72. Dies bestätigt die Vermutung, dass eine geschlossene und üppige Bodenvegetation in den alten Lücken einen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Messungen anhand beider Methoden ausübt.

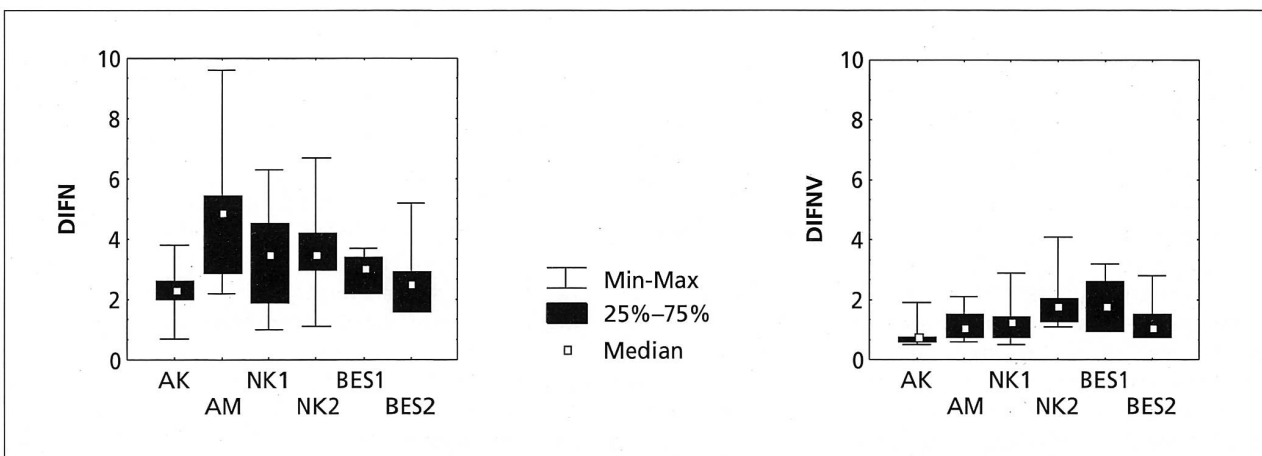


Abbildung 8: Links: Verteilung der DIFN-Werte aufgenommen mit LAI-2000 PCA nach Straten (AK – alte kleine Lücke, NK – neue kleine Lücke, AM – alte mittlere Lücke, BES – Bestand). Rechts: Verteilung der %DIFNV-Werte auf dem Waldboden, unterhalb der Bodenvegetation, nach Straten.

Figure 8: Left: Distribution of DIFN values taken with a LAI-2000 PCA according to strata (AK – old small gap, NK – new small gap, AM – old average gap, BES – stand). Right: Distribution of %DIFNV values on floor of forest, under the soil vegetation, according to strata.

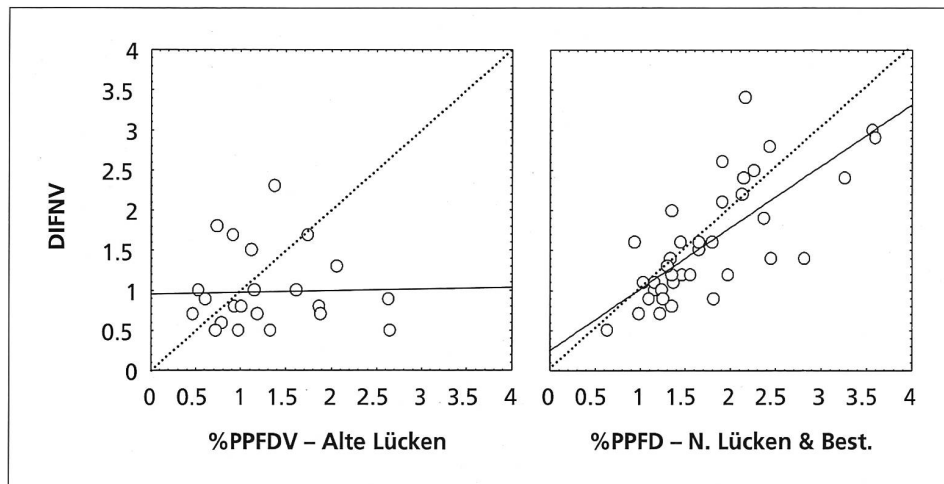


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen der relativen diffusen Strahlung aufgenommen mit LAI-2000 PCA (DIFNV) und mit momentaner %PAR-Methode (%PPFDV) getrennt nach Lückenalter.⁶

Figure 9: Relationship between the relatively diffuse radiation taken with a LAI-2000 PCA (DIFNV) and with instantaneous %PAR methods (%PPFDV) according to age of gap.

5. Diskussion und Folgerungen

5.1 Die LAI-2000 PCA- und die momentane %PAR-Methode

Die Untersuchung bestätigt eine gute Übereinstimmung zwischen den DIFN- und %PPFD-Werten aus momentanen Messungen, wobei die %PPFD-Werte etwas über den DIFN-Werten liegen. Verschiedene Autoren berichten über eine enge lineare Korrelation zwischen den momentan gemessenen DIFN und %PPFD; das sowohl miteinander (z.B. MACHADO & REICH 1999, STALDER 2000) als auch mit der relativen, mittleren, täglichen (saisonalen) Photonendichte (MESSIER & PUTTONEN 1995, COMEAU *et al.* 1998, GENDRON *et al.* 1998). Nach der Originalmethode (MESSIER & PUTTONEN 1995, PARENT & MESSIER 1996) sollten die %PPFD-Werte bei völlig bedecktem Himmel aufgenommen werden und das unabhängig von der Tageszeit (zwischen 8.00 und 18.00 Uhr). Ausserdem haben GENDRON *et al.* (1998) und COMEAU *et al.* (1998) festgestellt, dass durch die Verlängerung des Messintervalls (z.B. Durchschnitt einer Stunde) oder mehrerer momentaner Messungen pro Tag die Korrelation zur relativen mittleren Photonendichte verbessert werden kann.

In der vorliegenden Untersuchung wurden beide momentane Messungen (%PPFD und DIFN) nach dem Sonnenuntergang aufgenommen. STALDER (2000) berichtet über enge Korrelationen zwischen DIFN- und %PPFD-Werten und dies sowohl bei bedecktem als auch bei klarem Himmel ohne Sonne. Letztere Lichtmessmethode, welche bis jetzt wegen theoretisch unvorteilhafter Lichtverteilung am Himmel und zeitlicher Einschränkung wenig Aufmerksamkeit gewidmet wurde, ist also in Gebieten mit vielen sonnigen Tagen während der Vegetationsperiode ohne weiteres anwendbar.

Von der Verwendung einer anderen Variante der momentanen Messung zur Bestimmung des %PPFD, gemessen beim klaren Himmel gegen Mittag (z.B. DELONG 1991), wurde in neueren Untersuchungen wegen der grösseren Streuung der Werte abgeraten (MESSIER & PUTTONEN 1995, GENDRON *et al.* 1998). Dies haben wir darum nicht versucht.

Anhand guter Übereinstimmung zwischen den DIFN- und %PPFD-Werten aus momentanen Messungen glauben wir, dass die einfache und relativ billige momentane %PAR-Methode die wesentlich teurere LAI-2000 PCA-Methode bei der Schätzung der relativen diffusen Strahlung in waldbaulichen Untersuchungen befriedigend ersetzen kann.

Die Resultate haben zusätzlich eine systematische Überschätzung der DIFN- und %PPFD-Werte mit der Fischaugenfoto-Methode gezeigt. Für Kontrollzwecke wäre es darum sinnvoll, im unteren Strahlungsbereich einen Teil der FDIF%-Werte aus den hemisphärischen Fotos mit der momentanen

%PAR-Methode zu überprüfen. Daneben könnte man auch einen Teil der Fotos mit dieser schnellen und billigen Methode ersetzen, jedoch nur in Teilen der Lücken mit wenig direkter Strahlung (vgl. POULSON & PLATT 1989).

Unter der Bodenvegetation wurde eine viel schlechtere Übereinstimmung zwischen den %PPFD- und DIFN-Werten im Vergleich mit den Aufnahmen auf einem Meter festgestellt. Die Analysen haben weiter gezeigt, dass es unter geschlossener und üppiger Bodenvegetation in den alten Lücken keinen statistisch gesicherten Zusammenhang zwischen %PPFD- und DIFN-Werten mehr gibt. Dies führt zu der Vermutung, dass unterschiedliche Blickwinkel der beiden Methoden, 148° bei LAI-2000 und Punktmessung beim Quantum Sensor, zu diesen Abweichungen führen können. Dies kommt in und unter der Vegetationsdecke viel stärker zur Geltung als ausserhalb, weil die Sensoren sehr nahe bei den Blättern zu liegen kommen. Dazu ist es auch schwierig, genau am selben Punkt zu messen.

Die Ergebnisse sind in diesem Fall nicht zufriedenstellend und weisen auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zur Methodik der Lichtmessung unter der Bodenvegetation hin.

5.2 Die Fischaugenfoto-Methode

Die Analyse ergibt zudem auch einen engen linearen Zusammenhang zwischen den DIFN- und FDIF%-Werten der Fischaugenfotos ($r^2 = 0,96$). Dabei wurden die DIFN-Werte unter etwa 6% systematisch überschätzt. Die Regressionsanalyse bestätigt einen signifikanten Achsenabschnitt und Regressionskoeffizient. STALDER (2000), der mit demselben Programm die Auswertung der Fischaugenfotos durchgeführt hat (hemIMAGE⁷), berichtet über ein hohes Bestimmtheitsmass zwischen den Messreihen der LAI-2000 PCA-Methode und den Fischaugenfotos: Es betrug $r^2 = 0,83$ bei gleichmässiger Bewölkung bzw. $r^2 = 0,86$ bei klarem Himmel. Auch er hat eine Überschätzung der DIFN-Werte mit der Fischaugenfoto-Methode nachgewiesen. Im Gegensatz zu unserer Untersuchung zeigen seine Daten jedoch ansteigende Abweichungen mit zunehmenden DIFN-Werten.

Unsere Ergebnisse sind nur teilweise konform mit den Resultaten von DUCREY (1975b). Er konnte bei dem Vergleich von Pyranometer und Fischaugenfoto nachweisen, dass die Resultate bei der relativen Beleuchtung von 15 bis 20% gut übereinstimmen. Bei einer relativen Beleuchtung unter 10% wurden die Messungen mit dem Pyranometer jedoch unterbe-

⁶ Beide Variablen wurden am Waldboden unter der Bodenvegetation aufgenommen.

⁷ Brunner, A. (1998): Hemispherical photography and image analysis with hemIMAGE and Adobe Photoshop (unveröffentlicht).

wertet. Der Pyranometer weist aber eine andersartige, spektrale Empfindlichkeit im Vergleich zum Fischaugenfoto (BIGGS 1984) auf.

RICH *et al.* (1993) und MACHADO und REICH (1999) berichten zusätzlich über eine schwache Korrelation zwischen der Fischaugenfoto-Methode und den langfristig gemessenen PPF-D-Werten im unteren Strahlungsbereich. Sie weisen die Unzuverlässigkeit der Fischaugenfoto-Methode im unteren Strahlungsbereich der Subjektivität bei der Festlegung des Schwarzweiss-Schwellenwertes bei der Bearbeitung der Fischaugenfotos mit dem Bildbearbeitungsprogramm zu. Auch wir konnten mit der Festlegung verschiedener Grau-Schwellenwert-Stufen bei der Bildanalyse grosse Abweichungen nachweisen. Die Streuung kann vor allem im unteren Strahlungsbereich beträchtlich sein. Dies könnte auch in unseren Fall zur Überbewertung der DIFN-Werte geführt haben, da kleine diffuse Lücken ein ungünstiges Verhältnis zwischen Lückenfläche und Rand aufweisen. Es sind aber auch andere Fehlerquellen nicht zu vernachlässigen, z.B. die spektrale Empfindlichkeit des Filmmaterials, die von der spektralen Empfindlichkeit der grünen Pflanzen abweicht, oder andererseits die verschiedene Belichtung der Fotos. So könnte die Korrektur der Blenden, welche notwendig für einen besseren Kontrast ist (vgl. Kap. 3.1), zu systematischen Abweichungen der Strahlungswerte führen. Diese Abweichungen sind in absoluten Werten zwar klein, bei der diffusen Strahlung unter 5% können sie jedoch recht bedeutend werden.

Bei den Aufnahmen hat sich gezeigt, dass bei bedecktem Himmel besonders im Sommer relativ grosse Unterschiede an Helligkeit von einzelnen Himmelssegmenten bestehen können. Diese fallen bei der Auswertung der klar begrenzten grösseren Lücken nicht so ins Gewicht wie bei der Auswertung kleiner, unregelmässiger, ja sogar diffuser Lücken. Regelmässig bedeckter Himmel ist im Gebirge in unseren Breitengraden während der Sommerzeit eher eine Ausnahme. Deswegen empfehlen wir die Fotoaufnahmen bei klarem Himmel ohne Sonne, d.h. nach (bzw. vor) Sonnenuntergang (bzw. Sonnenaufgang) zu machen (vgl. auch WAGNER 1994, BRUNNER 1998).

Der wichtigste Nachteil der Methode bleibt neben der Subjektivität beim Auswerten die grosse Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen.

5.3 Die Horizontoskop-Methode

Das stabile Horizontoskop wurde in der Untersuchung mit berücksichtigt, um seine Genauigkeit bei ungünstigen Verhältnissen zu überprüfen. Die Korrelation mit den DIFN-Werten im Bereich der diffusen Strahlung ist überraschend gut ausgefallen. Im Allgemeinen liegen die gewonnenen Resultate höher verglichen mit den DIFN-Werten. Sehr wahrscheinlich gibt es mehrere Gründe für diese Abweichungen. Der wichtigste könnte in den suboptimalen Bedingungen bei den Aufnahmen liegen, weil das Horizontoskop die einzige Methode war, bei der die Aufnahmen zum Teil durch die direkte Sonne gestört wurden. Es wäre also zu erwarten, dass die Aufnahmen bei optimalen Bedingungen zu noch besserer Übereinstimmung der Resultate mit den DIFN-Werten führen würden.

Es ist jedoch anzumerken, dass bei den optimalen Aufnahmebedingungen (ohne Einfluss von direkter Sonnenstrahlung) die von den Blättern sukzessiv reflektierte direkte Strahlung («beam enrichment» sensu CANHAM *et al.* 1994) von allen hier behandelten Methoden unberücksichtigt bleibt. Diese Strahlungskomponente hat einen charakteristischen Einfluss auf das Waldlichtklima, besonders unter geschlossenen Beständen. Aus diesem Grund wäre es interessant, die Aufnahmen mit dem Horizontoskop unter dem Einfluss der direkten Strahlung noch mit PAR-Dauermessungen zu vergleichen.

Der zweite Grund für die Abweichung der HDIF%- von DIFN-Werten liegt in der Tendenz, die Anteile der sehr kleinen Lücken im Kronendach bei der Auszählung zu überschätzen (ANDERSON 1964). Deswegen ist es angebracht, bei der Zeichnung der Horizontogramme dünne Schreibstifte zu verwenden und klar zu definieren, ob die Umrisslinie zur Lückenfläche zählt oder nicht. Der dritte Grund könnte in der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges liegen, die von jener der grünen Pflanzen abweicht.

Das stabile Horizontoskop lieferte trotz ungünstiger Aufnahmebedingungen (unterer Strahlungsbereich, inhomogene Baumschicht, teilweise direkte Sonne) für die waldbauliche Praxis und für einfache waldbauliche Untersuchungen brauchbare Resultate. Die Vorteile des Horizontoskops sind: Robustheit, geringe Kosten, Möglichkeit der Ablesung der Werte direkt im Gelände, keine lange Auswertung, relativ unabhängig von den Wetterbedingungen. Die wesentlichen Nachteile liegen in der Subjektivität der Aufnahmen (abhängig vom Zeichentalent) und der Auswertung und im sehr grossen Aufwand in lichten Beständen. Es besteht heute die Möglichkeit, die Subjektivität mit einer computergestützten Auswertung der Horizontogramme (z.B. DIACI *et al.* 1999) zu minimieren.

5.4 Die spektralen Empfindlichkeit einzelner Instrumente

Die Reihenfolge der Strahlungsmittelwerte der verschiedenen Methoden sowohl oberhalb als auch unterhalb der Bodenvegetation (vgl. *Tabelle 1* und *4*) führt zur Annahme, dass die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit ein möglicher Grund für die Abweichungen der Schätzwerte sein könnte.

Der Sensor des LAI-2000 PCA erfasst die Strahlung im Bereich von 320 bis 490 nm. Die spektrale Empfindlichkeit der Fischaugenfotos hängt vom verwendeten Filmmaterial ab und nähert sich gewöhnlich dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich von 380 bis 760 nm (WAGNER 1994). Einen ähnlichen Bereich erfasst auch das Horizontoskop, denn die Strahlung wird mit dem menschlichen Auge erfasst. Die höchste Empfindlichkeit des menschlichen Auges ist bei 550 nm und fällt rasch bei höheren und niedrigeren Wellenlängen ab (vgl. DOHRENBUSCH 1995). Der Li-190A-Quantum Sensor erfasst die Wellenlängen von 400 bis 700 nm mit einer spektralen Empfindlichkeit, die der idealen Quantenreaktion gleicht (FEDERER & TANNER 1966a). Das Spektrum der auf den Waldboden anfallenden Sonnenstrahlung ist vor allem im Bereich der violetten, blauen, gelben und roten Strahlung verarmt. Es ist reich an grünem Anteil, welcher von Assimilationsorganen überproportional reflektiert und transmittiert wird (FEDERER & TANNER 1966b). In dieser Hinsicht wäre es verständlich, dass die DIFN- und DIFNV-Werte oberhalb und unterhalb der Bodenvegetation am niedrigsten sind. An zweiter Stelle folgen die %PPFD-Werte, bei welchen die grüne Lücke nicht berücksichtigt wird (vgl. DOHRENBUSCH 1995). Die grössten Werte wurden mit den Fischaugenfotos und dem Horizontoskop gemessen. Beide Methoden weisen die grösste spektrale Empfindlichkeit im grünen Bereich auf. Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass die DIFN- und %PPFD-Werte besser die für die grünen Pflanzen verfügbare Energie im Bestand und auf dem Waldboden repräsentieren.

5.5 Verjüngung und Strahlungsmessung – welches ist die richtige Methode?

Die FDIF%-Werte der Fischaugenfotos und teilweise auch die HDIF%-Werte des Horizontoskops zeigen einen signifikanten linearen Zusammenhang mit den DIFN-Werten. Beide Methoden weisen dabei eine systematische Überschätzung der DIFN-Werte auf. Die Abweichungen von der Fischaugenfoto-Me-

thode liegen dabei unserer Meinung nach im Toleranzbereich für verjüngungsökologische Untersuchungen, und diejenigen vom Horizontoskop liegen im Toleranzbereich für die waldbauliche Praxis. Der wichtigste Vorteil beider Methoden liegt in der Möglichkeit, neben der diffusen Strahlungskomponente die relative potenzielle direkte Sonnenstrahlung auswerten zu können. In Gebieten mit vielen sonnigen Tagen sind deswegen diese zwei Methoden der LAI-2000 PCA- oder der momentanen %PAR-Methode, welche nur die diffuse Strahlungskomponente messen können, überlegen.

In der Literatur wurde schon vor dem unkritischen Einsatz der momentanen %PAR-Methode nach MESSIER und PUTTONEN (1995) gewarnt (STADT *et al.* 1997). Der Hauptkritikpunkt ist, dass die Methode nur für homogene Bestände und kaum zur Beschreibung des Strahlungsklimas ganzer Bestände geeignet sei. Die zusätzlichen Vergleiche zeigen, dass die momentane %PPFD-Methode auch in relativ inhomogenen Beständen eng mit der relativen mittleren täglichen Photonenflussdichte korreliert (MESSIER & PARENT 1997, GENDRON *et al.* 1998). Auch wenn das für unsere Verhältnisse stimmen würde, stellt sich noch immer die Frage, in welchem Mass die Tages- bzw. Saisonmittelwerte der relativen %PPFD für verjüngungsökologische Untersuchungen geeignet sind.

In Urwäldern und oft auch in naturnahen Wirtschaftswald wird die Verjüngung der Baumarten in den Bestandeslücken indiziert oder zumindest etabliert. Dabei spielt die Asymmetrie der Strahlung in den Lücken vor allem bei der direkten Komponente der Strahlung eine bedeutende Rolle. In dieser Hinsicht können ökologisch sehr verschiedene Mikrostandorte in einer Lücke ähnliche oder sogar identische Gesamtstrahlungsmengen, gemessen in der relativen oder absoluten mittleren täglichen Photonenflussdichte, empfangen. So können z.B. südliche Lagen der Lücken vor dem Saum (Punkt 6 in *Abbildung 1*), die kein direktes und nur mässig diffuses Licht empfangen, ähnliche relative oder absolute mittlere tägliche Photonenflussdichten aufweisen wie nördliche Lagen unter dem Saum (Punkt 3 in *Abbildung 1*), die sehr wenig diffuses und viel direktes Licht empfangen. Dies ist rein physikalisch ein sinnvoller Vergleich, welcher jedoch ökologisch aus folgenden Gründen nicht zulässig ist:

1. Im Allgemeinen ist die unmittelbare Lichtausbeute der Pflanzen bei einem höheren Energieniveau direkter Strahlung niedriger im Vergleich zu gemässiger Energie diffuser Strahlung. Baumarten sind in dieser Hinsicht sehr unterschiedlich, was die Baumartenzusammensetzung beeinflusst.
2. Beide Strahlungskomponenten weisen verschiedene Einflüsse auf die abiotischen und biotischen Standortsfaktoren in der Lücke hinsichtlich Energiestärke und Geometrie der Energieverteilung auf. So weist beispielsweise die diffuse Strahlung ein mehr oder weniger Lücken-symmetrisches Verteilungsmuster auf. Dabei nähert sie sich der Verteilung der Niederschläge (ohne Beachtung des Windeinflusses). Die direkte Strahlung ist Lücken-asymmetrisch verteilt und weist unter anderem einen dominanten Einfluss auf die Wärmebilanz von Luft und Boden (Trockenheitsstress) auf. Die Lagen mit dominierender diffuser Strahlungskomponente sind also im Allgemeinen ozeanisch getönt, die Lagen mit dominierender direkter Komponente eher kontinental.

Aus den oben erwähnten Gründen ist die relative oder absolute mittlere tägliche Photonenflussdichte und damit auch die momentane %PPFD-Methode für verjüngungsökologische Untersuchungen alleine im Waldbau ungenügend. Verschiedene Untersuchungen zeigen die Relevanz beider Strahlungskomponenten sowohl in montaner (vgl. LÜSCHER 1990

und DIACI 2001) als auch in subalpiner Vegetationsstufe (vgl. FREHNER 2001). Daher bleibt die bewährte Methode mit den Fischaugenfotos eine wichtige Alternative zu den zeitraubenden Messungen mit einem Netz von PAR-Sensoren im Gelände. Noch ein wichtiger Grund befürwortet die Fischaugenfoto-Methode: Das Bild des Bestandes mit allen Strukturelementen bleibt erhalten.

6. Schlussbemerkungen

Wir haben in der vorliegenden Arbeit versucht, verschiedene Lichtmessmethoden zu testen und gegenüberzustellen. Es hat sich dabei gezeigt, dass jede Methode Vor- und Nachteile hat, die je nach der Fragestellung verschieden gewichtet werden können. Man muss sich also immer im Voraus fragen, welche Methode für die zu beantwortende Fragestellung die effizienteste ist.

Die Fischaugenfoto-Methode ist relativ aufwendig. Soweit ausschliesslich Interesse an der diffusen Himmelsstrahlung besteht, können die anderen mit Momentanmessungen arbeitenden Methoden (%PPFD, LAI-PCA) mit Vorteil eingesetzt werden. Für den in diesem Aufsatz nicht geprüften Fall, dass auch die direkte Sonnenstrahlung berücksichtigt werden soll, sind die Fischaugenfotos allen anderen momentan messenden Verfahren jedoch überlegen.

Für einfachere Untersuchungen bedeutet das stabilisierte Horizontoskop eine kostengünstige Alternative mit beschränkter Genauigkeit. Für beide Methoden bleibt der Einfluss der spektralen Empfindlichkeit der einzelnen Pflanzenpigmente offen. Für die Fischaugenfotos ist die Standardisierung der Methode ein wichtiger Schritt für die Zukunft. Diesbezüglich müssen bei der Bildbearbeitung und Festlegung des Schwarzweiss-Schwellenwertes neue Massstäbe gesetzt werden.

In der Problematik der Lichtmessung im Wald bleibt auch in Zukunft noch viel zu tun. Die Erläuterung der in der vorliegenden Untersuchung nicht näher diskutierten Frage der Lichtqualität im Bestand gewinnt gemäss neuesten Untersuchungen immer mehr an Bedeutung. Hier sind noch sehr viele Fragen offen. Zusätzlich ist die bis anhin meist zur Vereinfachung getätigte Unterteilung der Strahlung in eine diffuse und direkte Komponente zu hinterfragen. Diese Unterteilung ist im Grunde genommen völlig künstlich und entbehrt keiner genauen physikalischen Grundlage. Welche bessere einfache Alternative in Frage käme, ist jedoch noch völlig ungelöst und ist eine nicht einfach zu lösende, herausfordernde Forschungsfrage der Zukunft.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Erfahrungen zur diffusen Strahlungsschätzung im Wald mit Fischaugenfotos, dem fixierten Horizontoskop, dem plant canopy analyser PCA (Li-COR 1992) und momentaner Messungen der fotosynthetisch aktiven Strahlung PAR mittels zwei Quantum Sensoren unter anspruchsvollen Bedingungen aus verjüngungsökologischer und waldbaulicher Sicht vorgestellt. Die Untersuchungen wurden in zwei Buchennaturwäldern in montaner Höhenlage im Krassica Gebirge in Slowenien im Sommer 1999 durchgeführt.

Insgesamt ergab sich eine überaus gute Übereinstimmung aller vier Messmethoden bei idealen, von der direkten Sonnenstrahlung wenig bis nicht beeinflussten Bedingungen. Es hat sich gezeigt, dass die Genauigkeit aller Methoden sehr stark von den Messbedingungen abhängig ist. Die Fischaugenfotos reagieren dabei am sensibelsten. Das mittels eines konstruierten Aufsatzes auf einem Stativ fixierte Horizontoskop lieferte ausserdem erstaunlich gute Resultate. Es bildet eine

echte, billige Alternative für Aufnahmen in der Forstpraxis, ist aber stark vom Zeichentalent der Person abhängig.

Im unteren Strahlungsbereich von unter 6% relativer, diffuser Strahlung wurden zudem die Werte von den Fischaugenfotos systematisch etwas überschätzt oder je nach Blickwinkel diejenigen des LAI-PCA unterschätzt. Die momentane Messung der fotosynthetisch aktiven Strahlung ergab auch sehr gute Resultate, die aus ökologischen Gründen aber noch weiter zu diskutieren sind.

Die Vor- und Nachteile der vier Methoden werden ausführlich dargestellt und deren Einsatz für ökologische Untersuchung im Wald vorgestellt. Dabei wird auch auf die ökologische Bedeutung einzelner Strahlungsbereiche differenziert eingegangen.

Summary

A comparison of solar radiation estimation methods in old-aged beech forests in Slovenia from the point of view of ecological regeneration

In this paper we describe our experience with diffuse radiation estimation in forests using hemispherical photographs, a fixed horizontoscope, a plant canopy analyser (LI-COR 1992), and instantaneous measurements of the photosynthetic active radiation (PAR) using two quantum sensors under exacting conditions regarding ecological regeneration and silvicultural management. The investigations were carried out in two old-aged beech forests in the mountainous region of Krasica in Slovenia in summer 1999.

All four methods delivered very similar results under ideal conditions not influenced – or only slightly – by direct radiation. It was seen that the precision of all methods strongly depends on the conditions under which they are applied. In addition, amazingly good results were obtained by the construction of an attachment fixed to a horizontoscope set up on a tripod. It is a viable, cheap alternative for forest management, but a lot depends on the drawing talent of the operator.

At lower levels of radiation of under 6% relative radiation diffusion was systematically overrated using the hemispherical photographs or – depending on the angle of measurement – underrated using the LAI-PCA. The instantaneous measurements of photosynthetic active radiation also delivered very good results which should, however, for ecological reasons, be the subject of further discussions.

The advantages and disadvantages of the four methods are shown in detail and their use for ecological investigations of forests discussed. We also expound on the ecological consequences of particular radiation levels.

Translation: ANGELA RAST-MARGERISON

Résumé

Comparaison de différentes méthodes de mesure de la lumière dans des hêtraies naturelles de Slovénie – une analyse du point de vue de l'écologie du rajeunissement

Le présent article fait part des expériences acquises en matière d'estimation du rayonnement diffus en forêt à l'aide de photos «fish-eyes», de l'horizontoscope, de l'instrument «plant canopy analyser (PCA)» (LI-COR 1992) et de mesures momentanées du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) au moyen de deux capteurs quantiques, dans des conditions exigeantes d'un point de vue sylvicole et de l'écologie du rajeunissement. Les recherches ont été effectuées durant l'été 1999 dans deux hêtraies naturelles de l'étage montagnard faisant partie des montagnes slovènes de Krasica.

Globalement, on peut dire que les quatre méthodes de mesure concordent très bien entre elles lorsque les conditions sont idéales, c.-à-d. faiblement influencées ou préservées du rayonnement solaire direct. Il s'est avéré que la précision des méthodes dépend très fortement des conditions de mesure et que ce sont les photos «fish-eyes» qui réagissent le plus sensiblement. L'horizontoscope fixé sur un trépied au moyen d'un dispositif particulier a par ailleurs fourni de très bons résultats. Il constitue par conséquent une véritable alternative peu coûteuse pour des relevés forestiers. La qualité des résultats dépend néanmoins fortement des talents de dessinateur de l'utilisateur.

Lorsque le rayonnement diffus relatif est inférieur à 6%, on a systématiquement surestimé quelque peu les valeurs des photos «fish-eyes» ou sous-estimé celles de l'instrument «LAI-PCA» en fonction de l'angle. La mesure momentanée du rayonnement photosynthétiquement actif a également fourni de très bons résultats qui doivent cependant encore être discutés pour des raisons écologiques.

Cet article expose de manière détaillée les avantages et les inconvénients des quatre méthodes et présente leur utilisation pour la recherche écologique en forêt. Il traite encore de façon différenciée de l'importance écologique de certaines zones de rayonnement.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Literatur

- ANDERSON, M.C. (1964): Studies of woodland light climate I. The photographic computation of light conditions. *J. Ecol.* 52: 27–41.
- BIGGS, W. (1984): Radiation Measurement. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Advanced Agricultural Instrumentation, edited by Gensler, W.G., Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands: 1–5.
- BRANG, P. (1998): Early seedling establishment of *Picea abies* in small forest gaps in the Swiss Alps. *Can. J. For. Res.* 28: 626–639.
- BRUNNER, A. (1994): Ökologische Lichtmessung im Wald. *Forstarchiv* 65: 133–138.
- CANHAM, C.D., FINZI, A.C., PACALA, S.W., BURBANK, D.H. (1994): Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Can. J. For. Res.* 24: 337–349.
- CHASON, J.W., BALDOCCHI, D.D., HUSTON, M.A. (1991): A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agric. For. Meteorol.* 57: 107–128.
- CHAZDON, R.L. and FIELD, C.B. (1987): Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73: 525–532.
- COMEAU, P.G., GENDRON, F., LETCHFORD, T. (1998): A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixed-wood stand. *Can. J. For. Res.* 28: 1843–1850.
- DELONG, S.C. (1991): The light interception index: a potential tool for assisting in vegetation management decisions. *Can. J. For. Res.* 21: 1037–1042.
- DIACI, J. (1997): Experimentelle Felduntersuchungen zur Naturverjüngung künstlicher Fichtenwäldern auf Tannen-Buchenwaldstandorten (*Homogyno sylvestris-Fagetum*) in den Savinja-Alpen (Slowenien) mit besonderer Berücksichtigung der Ansamungsphase und unter dem Einfluss der Faktoren Licht, Vegetation, Humus und Kleinsäuger. *Beih. Schweiz. Z. Forstwes.* Nr. 80, 197 S.
- DIACI, J. (1999): Meritve soncnega sevanja v gozdu – I. Presoja metod in instrumentov. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 58: 105–138.
- DIACI, J. (2001): Regeneration dynamics in a Norway spruce plantation on a silver fir-beech forest site in the Slovenian Alps. *Forest ecology and management (Angenommen für die Veröffentlichung)*.
- DIACI, J., THORMANN, J.-J., KOLAR, U. (1999): Meritve soncnega sevanja v gozdu – II. Metode na osnovi projekcij hemisfere neba in krošenj. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 60: 177–210.
- DIACI, J. und KOLAR, U. (2000): Umerjanje objektivna «ribje oko» za fotografijo hemisfere. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 61: 5–25.
- DOHRENBUSCH, A. (1989): Die Anwendung fotografischer Verfahren zur Erfassung des Kronenschlussgrades. *Forstarchiv* 60: 151–155.

- DOHRENBUSCH, A. (1995): Überlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessung im Wald. *Allg. Forst- Jagdztg.* 166: 109–114.
- DUCREY, M. (1975a): Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire: I. – Analyse théorique de l'interception. *Ann. sci. for.* 32 (2): 73–92.
- DUCREY, M. (1975b): Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire: II. – Etude expérimentale. *Ann. sci. for.* 32 (4): 205–221.
- EASTER, M.J. and SPIES, T.A. (1994): Using hemispherical photography for estimating photosynthetic photon flux density under canopies and in gaps in Douglas-fir forests of the Pacific Northwest. *Can. J. For. Res.* 24 (10): 2050–2058.
- EVANS, G.C. and COOMBE, D.E. (1959): Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. *J. Ecol.* 47: 103–113.
- EVANS, G.C., FREEMAN, P., RACKHAM, O. (1975): Developments in hemispherical photography. In: Evans, G.C., Bainbrige, R., Rackham, O. (eds.): *Light as an ecological factor II.* – Blackwell, Oxford: 549–556.
- FEDERER, C.A. and TANNER, C.B. (1966a): Sensors for measuring light available for photosynthesis. *Ecology* 47 (4): 654–657.
- FEDERER, C.A. and TANNER, C.B. (1966b): Spectral distribution of light in the forest. *Ecology* 47 (4): 555–560.
- FRAZER, G.W., CANHAM, C.D., LERTZMAN, K.P. (1999): Gap Light Analyzer (GLA). Users manual and program documentation, Version 2.0, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia. (<http://www.rem.sfu.ca/forestry/index.htm>)
- FREHNER, M. (1989): Beobachtungen zur Einleitung der Naturverjüngung an einem nordexponierten Steilhang im subalpinen Fichtenwald. *Schweiz. Z. Forstwes.* 140 (11): 1013–1022.
- FREHNER, M. (2001): Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Kleinstandorte und der Pflanztechnik auf Fichtenpflanzungen in subalpinen Lawenschutzwäldern. *Beih. Schweiz. Z. Forstwes.* Nr. 92, 280 S.
- 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 (1): 55–70.
- GREIS, I. and KELLOMÄKI, S. (1981): Crown structure and stem growth of Norway spruce undergrowth under varying shading. *Silva Fennica* 15 (3): 306–322.
- HERBERT, T.J. (1986): Calibration of fisheye lenses by inversion of area projections. *Applied optics* 25 (12): 1875–1976.
- KREBS, B. (2001): Untersuchungen des Lärchenaufwuchses in Abhängigkeit vom direkten und diffusen Licht im Unterengadin. Diplomarbeit an der Professur Waldbau im Departement Forstwissenschaften der ETH Zürich (unveröffentlicht).
- LI-COR (1992): LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Operating Manual. Lincoln, Nebraska.
- LIEFFERS, V.J., MESSIER, C., STADT, K.J., GENDRON, F., COMEAU, P.G. (1999): Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Can. J. For. Res.* 29: 796–811.
- LÜSCHER, F. (1990): Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im inneralpinen Gebirgswald. Dissertation, Nr. 8879, ETH-Zürich, Professur für Waldbau.
- MACHADO, J.-L. and REICH, P.B. (1999): Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. *Can. J. For. Res.* 29: 1438–1444.
- MADGWICK, H.A.I. and BRUMFIELD, G.L. (1969): The use of hemispherical photographs to assess light climate in the forest. *J. Ecol.* 57 (2): 537–542.
- MESSIER, C. and PUTTONEN, P. (1995): Spatial and temporal variation in the light environment of developing Scots pine stands: the basis for a quick and efficient method of characterizing light. *Can. J. For. Res.* 25: 343–354.
- MESSIER, C. and PARENT, S. (1997): Reply – The effects of direct-beam light on overcast-day estimates of light availability: On the accuracy of the instantaneous one-point overcast-sky conditions method to estimate mean daily %PPFD under heterogeneous overstory canopy conditions. *Can. J. For. Res.* 27: 274–275.
- OTT, E. (1989): Verjüngungsprobleme in hochstaudenreichen Gebirgswaldern. *Schweiz. Z. Forstwes.* 140 (1): 23–42.
- PARENT, S. and MESSIER, C. (1996): A simple and efficient method to estimate microsite light availability under a forest canopy. *Can. J. For. Res.* 26: 151–154.
- POULSON, L.T. and PLATT, W.J. (1989): Gap light regimes influence canopy tree diversity. *Ecology* 70 (3): 553–555.
- RICH, P.M., CLARK, D.B., CLARK, D.A., OBERBAUER, S.F. (1993): Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 65 (1–2): 107–127.
- SCHMERBER, C. (1997): Les arbres face à la lumière. *ONF Bull. techn.* n° 34: 45–108.
- SCHÜTZ, J.-P. et BRANG, P. (1995): L'horizontoscope: un étonnant outil pratique de sylviculture, notamment en haute montagne. *ONF Bull. techn.* n° 28: 1–7.
- STADT, K.J., LANDHÄUSSER, S.M., STEWART, J.D. (1997): Comment – The effects of direct-beam light on overcast-day estimates of light availability. *Can. J. For. Res.* 27: 272–274.
- STALDER, R. (2000): Vergleich verschiedener Lichtmessmethoden im Walde (LAI-2000 PCA, Fischaugenphotos) im unteren Strahlungsbereich in Abhängigkeit von Beschirmungsgrad und -form sowie der Aufnahmebedingungen. Diplomarbeit an der Abteilung für Forstwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Professur Waldbau, 85 S, ETH-FOR P1633.
- THORMANN, J.-J. (1997): Zur Methodik der Lichtmessung im Wald. Ein Vergleich von LAI-2000 Plant Canopy Analyser, Fisheye-Foto und Horizontoskop. Schlussbericht, ETH Zürich, Professur für Waldbau, 36 S. (Kann beim Autor bezogen werden.)
- TONNE, F. (1954): *Besser bauen mit Besonnungs- und Tageslicht-Planung.* Stuttgart, Verlag Karl Hofmann, 41 S.
- VON LÜPKE, B. (1982): Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbeständen. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen*, Band 74, 123 S.
- WAGNER, S. (1994): Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen*, Reihe A, Bd. 123, 166 S.
- WAGNER, S. (1996): Übertragung strahlungsrelevanter Wetterinformation aus punktuellen PAR-Sensordaten in grössere Versuchsfächenanlagen mit Hilfe hemisphärischer Fotos. *Allg. Forst- Jagdztg.* 167: 34–40.
- WELLES, J.M. and NORMAN J.M. (1991): Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.* 83: 818–825.
- WRABER, M. (1963): *Gozdno-gojitveni elaborat za območje gozdnega gospodarstva Nazarje.* Institut za biologijo pri SAZU, Ljubljana, 73 S.

Dank

Wir danken Prof. Dr. J.-P. Schütz, Leiter der Professur Waldbau der ETH Zürich und zwei anonymen Reviewern für die vielen wertvollen Hinweise und Anmerkungen bei der kritischen Durchsicht einer ersten Version des Aufsatzes.

Autoren

Dr. JURIJ DIACI, University of Ljubljana, Department of Forestry, Vecna pot 83, SLO-61111, Ljubljana, Slovenia, Tel. +386 1 123 11 61, E-Mail: diaci.jurij@uni-lj.si.
 JEAN-JACQUES THORMANN, Dipl. Forst-Ing., Buwal, Eidg. Forstdirektion, Bereich Schutzwald und Naturgefahren, 3003 Bern, Tel. 031 323 93 98, E-Mail: jeanjacques.thormann@buwal.admin.ch.