

- Wu, H.-I., Sharpe, P.J.H., Walker, J., Penridge, L.K. 1985. Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants. *Ecol. Model.* 29, 215-243
- Wunder, J., Brang, P. 2003. Fichtenverjüngung im Gebirgswald: Erfolgskontrolle in Schlitzten. *Wald und Holz* 84, 13-14
- Wurtz, T.L., Zasada, J.C. 2001. An alternative to clear-cutting in the boreal forest of Alaska: a 27 year study of regeneration after shelterwood harvesting. *Can. J. For. Res.* 31, 999-1011
- York, R.A., Battles, J.J., Heald, R.C. 2003. Edge effects in mixed conifer group selection openings: tree height response to resource gradients. *For. Ecol. Manage.* 179, 107-121
- Zamora, R., Gómez, J.M., Hódar, J.A., Castro, J., García, D. 2001. Effect of browsing by ungulates on sapling growth of Scots pine in a Mediterranean environment: consequences for forest regeneration. *For. Ecol. Manage.* 144, 33-42
- Zhu, J., Matsuzaki, T., Lee, F., Gonda, Y. 2003. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest. *For. Ecol. Manage.* 182, 339-354
- Zöhner, F. 1980. *Forstinventur: Ein Leitfaden für Studium und Praxis.* Verlag Paul Parey, Hamburg u. Berlin

FORSTARCHIV 75 (2004), 110–121

Hinweise zur Erfassung von Strahlung und Kronenraumstruktur in Waldbeständen im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen

Sven Wagner¹, Ralf Küßner¹, Christian Ammer² und Achim Dohrenbusch³

¹Institut für Waldbau und Forstschutz, Technische Universität Dresden, Piener Str. 8, D-01735 Tharandt

²Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung, Technische Universität München, Am Hochanger 13, D-85354 Freising

³Institut für Waldbau, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 1, D-37077 Göttingen

Eingegangen: 06.02.2004 Angenommen: 27.03.2004

Kurzfassung: Strahlungsmessungen und Erfassungen der Kronenraumstruktur im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen werden zu sehr unterschiedlichen Zwecken durchgeführt. Dabei gilt es generell, zu bedenken, dass schon Strahlungsmessungen oberhalb von Waldbeständen sorgfältiger methodischer Vorüberlegungen bedürfen. Dies betrifft die zu messenden Wellenlängen, die Einheiten der Messungen der PAR, direkte und diffuse Strahlungskomponenten, die Witterungseinflüsse (Wolken) und schließlich auch den Sonnenstand über Horizont und die Neigung der Empfangsfläche sowie Geländeeffekte. Innerhalb von Waldbeständen beeinflussen außerdem die optischen Blatteigenschaften, die absolute Größe der Blattflächen pro Quadratmeter (LAI), die Blattneigungswinkel, das Ausmaß von Blattklumpungen wie auch die Eigenschaften der Zweige und Stämme die Strahlungsmessungen. Die Durchführung der Messungen kann einmalig (momentan) oder auch dauernd (permanent) erfolgen. Eine Vielzahl von Geräten steht zur Verfügung, deren Vor- und Nachteile für einzelne Forschungsvorhaben dargestellt werden. Die Erfassung der Kronenraumstruktur kann sowohl mit direkten wie auch indirekten Methoden erfolgen. Die Unterscheidung von Einzelbaumuntersuchungen und bestandesbezogenen Untersuchungen ist üblich. Es werden die grundsätzlichen Möglichkeiten aufgezeigt und Empfehlungen für Einzelfälle abgeleitet.

Measurements of radiation and canopy structure in forests within silvicultural research projects: some general remarks

Abstract: Radiation measurements in forests need an intensive pre-evaluation of aims and methods available. Important issues of concern in measurements performed above canopy are wavelength, units of PAR measurements, diffuse and direct components of radiation, weather impact (e.g. clouds), angle of sun position above horizon, angle of radiation receiving elements and further site specific factors. Measurements within forest stands have to take into account optical characteristics of leaves, leaf area index (LAI), angle of leaf inclination, clumping issues as well as optical characteristics of twigs, branches and boles. Measurements may be performed instantaneously as well as permanent. Many radiation measuring instruments are available for which advantages and disadvantages are admitted. Hints for radiation models in use and software available are given. Canopy structure might be evaluated with direct as well as with indirect methods. Focus is on single trees or on entire stand features. Available methods for different purposes are listed and recommendations for specific tasks are given.

Key words: radiation measurements, canopy structure, hemispherical photography, regeneration research, canopy gaps

- Schmerbeck, J. 2003. Patterns of forest use and its influence on degraded dry forests: A case study in Tamil Nadu, South India. Shaker, Aachen
- Schönenberger, W. 2002. Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: the first ten years after the 1990 storm Vivian. For. Snow Landsc. Res. 77, 61-80
- Schrempf, W. 1978. Analyse der Verjüngung im Fichten-Tannen-Buchen-Urwald Rothwald in Niederösterreich. Cbl. ges. Forstwesen 95, 217-245
- Schulze, I.-M., Bolte, A., Seidling, W., Stetzka, K.-M., Wellbrock, N. 2000. Vegetationskundliche Aufnahmen im Level II-Programm: Methoden, Auswertungen, erste Ergebnisse. Forstarchiv 71, 76-83
- Schulze, I.-M., Eichhorn, J. 2000. Veränderungen im Stickstoffhaushalt von Buchenwäldern auf Basalt: Die Ausbreitung der Großen Brennnessel (*Urtica dioica* L.) und ihr Einfluss auf die natürliche Verjüngung der Buche. Forst u. Holz 55, 435-441
- Schupp, E.W. 1995. Seed-seedling conflicts, habitat choice, and patterns of plant recruitment. Amer. J. Bot. 82, 399-409
- Schwyzler, A., Zinggeler, J. 2000. Eine neue Methode zur Quantifizierung des Wildverbisses. Schw. Z. Forstwes. 151, 107-116
- Shainsky, L.J., Radosevich, S.R. 1992. Mechanisms of competition between Douglas-Fir and Red Alder seedlings. Ecology 73, 30-45
- Sikström, U., Gläde, D. 2000. Damage to *Picea abies* regeneration after final cutting of shelterwood removal with single and double-grip harvester systems. Scan. For. Res. 15, 274-283
- Silvertown, J.W., Doust, J.L. 1997. Introduction to plant population biology. 3. Aufl. Blackwell Science, Oxford
- Smidt, M.F., Puettmann, K.J. 1998. Overstory and understory competition affect underplanted eastern white pine. For. Ecol. Manage. 105, 137-150
- Stadt, K.J., Lieffers, V.J. 2000. MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands. Agric. For. Meteorol. 102, 235-252
- Sterba, H., Golser, M., Schweiger, J., Hasenauer, H. 1997. Modelle für das Ankommen und das Wachstum der Naturverjüngung. Cbl. ges. Forstwesen 114, 11-33
- Stoyan, D., Wagner, S. 2001. Estimating the fruit dispersion of anemochorous forest trees. Ecol. Model. 145, 35-47
- Struck, G., Dohrenbusch, A. 2000. Development of a new branchiness index ASIX – a simple tool to describe branchiness in young deciduous forest stands. Ann. For. Sci. 57, 811-818
- Suner, A., Röhrig, E. 1980. Die Entwicklung der Buchenverjüngung in Abhängigkeit von der Auflichtung des Altbestandes. Forstarchiv 51, 145-149
- Szwagrzyk, J., Szewczyk, J., Boziarczyk, J. 2001. Dynamics of seedling banks in beech forest: results of a 10-year study on germination, growth and survival. For. Ecol. Manage. 141, 237-250
- Takyu, M. 1998. Shoot growth and tree architecture of saplings of the major canopy dominants in a warm-temperate rainforest. Ecol. Research 13, 55-64
- Tesch, S.D., Korpela, E.J., Hobbs, S.D. 1993. Effects of sclerophyllous shrub competition on root and shoot development and biomass partitioning of Douglas-fir seedlings. Can. J. For. Res. 23, 1415-1426
- Thomasius, H. 1963. Über die Anlage und Auswertung forstlicher Versuche auf Flächen mit unterschiedlicher Standortsgüte. Archiv f. Forstwes. 12, 542-567
- Thurston, S.W., Krasny, M.E., Martin, C.W., Fahey, T.J. 1992. Effect of site characteristics and 1st and 2nd-year seedling densities on forest development in a northern hardwood forest. Can. J. For. Res. 22, 1860-1868
- Urban, D.L., Bonan, G.B., Smith, T.M., Shugart, H.H. 1991. Spatial applications of gap models. For. Ecol. Manage. 42, 95-110
- Urbanska, K.M. 1992. Populationsbiologie der Pflanzen: Grundlagen, Probleme, Perspektiven. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Ustin, S.L., Woodward, R.A., Barbour, M.G., Hatfield, J.L. 1984. Relationships between sunfleck dynamics and red fir seedling distribution. Ecology 65, 1420-1428
- Wada, N., Ribbens, E. 1997. Japanese Maple recruitment patterns: seeds, seedlings, and saplings in relation to conspecific adult neighbors. Am. J. Bot. 84, 1294-1300
- Wagner, R.G., Peterson, T.D., Ross, D.W., Radosevich, S.R. 1989. Competition thresholds for the survival and growth of Ponderosa Pine seedlings associated with woody and herbaceous vegetation. New Forests 3, 151-170
- Wagner, R.G., Radosevich, S.R. 1991a. Neighbourhood predictor of interspecific competition in young Douglas-Fir plantations. Can. J. For. Res. 21, 821-828
- Wagner, R.G., Radosevich, S.R. 1991b. Interspecific competition and other factors influencing the performance of Douglas-Fir saplings in the Oregon coast range. Can. J. For. Res. 21, 829-835
- Wagner, S. 1997. Ein Modell zur Fruchtausbreitung der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) unter Berücksichtigung von Richtungseffekten. Allg. Forst- u. Jagdztg. 168, 149-155
- Wagner, S. 1999. Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. Schriften Forstl. Fakultät Univ. Göttingen, Nieders. Forstl. Versuchsanstalt 129. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Wagner, S., Küßner, R., Ammer, C., Dohrenbusch, A. 2004. Hinweise zur Erfassung von Strahlung und Kronenraumstruktur in Walbeständen im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen. Forstarchiv. 75, 110-121
- Wagner, S., Wälder, K., Ribbens, E., Zeibig, A. Directionality in fruit dispersal models for anemochorous forest trees. Ecol. Model. In press
- Walters, M.B., Reich, P.B. 1996. Are shade tolerance, survival, and growth linked? Low light and nitrogen effects on hardwood seedlings. Ecology 77, 841-853
- Walters, M.B., Reich, P.B. 1997. Growth of *Acer saccharum* seedlings in deeply shaded understories of northern Wisconsin: effects of nitrogen and water availability. Can. J. For. Res. 27, 237-247
- Wang, G.G., Su, J., Wang, J.R. 2000. Height growth of planted black spruce seedlings in response to interspecific vegetation competition: a comparison of four competition measures at two measuring positions. Can. J. For. Res. 30, 573-579
- Ward, J.S., Parker, G.P.R. 1989. Spatial dispersion of woody regeneration in an old-growth forest. Ecology, 70, 1279-1285
- Waring, R.H., Schroeder, P.E., Oren, R. 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. Can. J. For. Res. 12, 556-560
- Warren Wilson, J. 1981. Analysis of growth, photosynthesis and light interception for single plants and stands. Ann. Bot. 48, 507-512
- Watt, M.S., Whitehead, D., Mason, E.G., Richardson, B., Kimberley, M.O. 2003. The influence of weed competition for light and water on growth and dry matter partitioning of young *Pinus radiata* at a dryland site. For. Ecol. Manage. 183, 363-376
- Weigelt, A., Jolliffe, P. 2003. Indices of plant competition. J. Ecology 91, 707-720
- Weihls, U., Klaene, K. 2000. Wuchsdynamik und Qualität von Buchen-voranbauten unter Fichtenaltholz auf Basaltstandorten im Hessischen Forstamt Kassel. Forst u. Holz 55, 177-181
- Weiner, J., Thomas, S.C. 1986. Size variability and competition in plant monocultures. Oikos 47, 211-222
- Welch, D., Staines, B.W., Scott, D., French, D.D., Catt, D.C. 1991. Leader browsing by red and roe deer on young Sitka Spruce trees in Western Scotland. I. Damage rates and the influence of habitat factors. Forestry 64, 61-82
- Wenström, U., Bergsten, U., Nilsson, J.-E. 2001. Early seedling growth of *Pinus sylvestris* after sowing with a mixture of stand and orchard seed in dense spacings. Can. J. For. Res. 31, 1184-1194
- White, D.E., Newton, M. 1989. Competitive interactions of whiteleaf Manzanita, herbs, Douglas-fir, and ponderosa Pine in southwest Oregon. Can. J. For. Res. 19, 232-238
- Willert, D. von, Matyssek, R., Herppich, W. 1995. Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. G. Thieme Verlag, Stuttgart, New York
- Williams, H., Messier, Ch., Kneeshaw, D.D. 1999. Effects of light availability and sapling size on the growth and crown morphology of understory Douglas-fir and lodgepole pine. Can. J. For. Res. 29, 222-231
- Williams, M.S. 2001. New approach to areal sampling in ecological surveys. For. Ecol. Manage. 154, 11-22
- Willson, M.F. 1993. Dispersal mode, seed shadows, and colonization patterns. Vegetatio 107/108, 261-280
- Wilson, J.B. 1988. A review of evidence on the control of shoot:root ratio, in relation to models. Ann. Bot. 61, 433-449
- Woodruff, D.R., Bond, B.J., Ritchie, G.A., Scott, W. 2002. Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees. Can. J. For. Res. 32, 420-427
- Wright, E.F., Canham, C.D., Coates, K.D. 2000. Effects of suppression and release on sapling growth for tree species of northern, interior British Columbia. Can. J. For. Res. 30, 1571-1580

Buchbesprechungen

Als Schüler von Johann Georg von Langen (1699-1776) war es Zanthiers Verdienst, mit der Herstellung einer räumlichen Ordnung im Wald die zu nutzenden Bestände auf das Produktionsziel und nicht auf den Bedarf ausgerichtet zu haben.

Die erneute Durchsicht und Auswertung weitgehend aller Quellen von dem und über den Oberforst- und Jägermeister von Zanthier ermöglichten jetzt, nicht nur die Angaben über seinen Lebensweg und seine beruflichen Leistungen zu berichtigen bzw. zu ergänzen, sondern diese bestätigen uneingeschränkt seinen ruhmvollen Platz als Wegbereiter unserer heutigen nachhaltigen Waldbewirtschaftung.

Diese vom Verlag sehr ansprechend gestaltete und gegenüber der Erstauflage um 32 Abbildungen und um 36 Quellenbelege ergänzte Schrift gehört in jede forstliche Handbibliothek und wird zur Anschaffung bestens empfohlen.

Bernd Bendix, Tarnau

W. Härdtle, J. Ewald u. N. Hölzel. *Wälder des Tieflandes und der Mittelgebirge*. 2004. 253 S., 41 Tab., 112 Abb. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. ISBN 3-8001-3285-0. 69,90 €.

Die drei Autoren dieses Buches sind an den Universitäten Lüneburg und Gießen sowie an der Fachhochschule Weihenstephan in den Gebieten Landschaftsökologie, Naturschutz und verwandten Fächern tätig. Der Inhalt des Werkes lässt sich in zwei größere Komplexe zusammenfassen. In den ersten 4 Kapiteln werden auf etwa 100 Seiten nach einer kurzen Einführung allgemeine Aspekte behandelt: Vegeta-

tionsgeschichte, Einfluss des Menschen auf die Waldentwicklung in der Spät- und Nacheiszeit, klimatische, geomorphologische und bodenkundliche Grundlagen der Vegetation, Struktur, Wasserhaushalt und Nährstoffverhältnisse der Wälder. Im zweiten Komplex von etwa gleicher Länge behandeln die Autoren die wichtigsten Waldtypen: Buchen- und Buchenmischwälder, Eichen- und Eichenmischwälder, Edellaubbaumwälder, tannenreiche Nadel-Mischbaumwälder, Fichtenwälder, Kiefernwälder. Dann folgt ein kurzes Kapitel „Wald und Naturschutz“. Den Abschluss bilden Literaturverzeichnis und Register.

Die Konzeption ist einleuchtend, das Problem liegt darin, sie auf so begrenztem Raum auszufüllen. Das war für die Autoren eine schwierige Aufgabe, die sie nicht gut gelöst haben. Dazu nur wenige Beispiele: Die Schilderung der Waldnutzungen im Mittelalter und der Neuzeit betrifft ausschließlich Waldweide und Streunutzung. Unerwähnt bleiben die tiefgreifenden Wirkungen auf Baumartenanteile und Waldstrukturen durch Erzgewinnung, Köhlerei, Bergbau, Salinenbetrieb. Mantel hat das alles geschildert, andere wichtige Quellen (Hasel, Kremser) fehlen auch im Literaturverzeichnis. Aus diesen Arten von Waldnutzung erklären sich aber weitgehend die sehr knapp behandelten Betriebsarten Nieder- und Mittelwald, deren Erhaltung und Wiederherstellung heute eines der Naturschutzziele bilden. Dringender wäre noch eine gute Darstellung der Verjüngungsformen dem Buch angestanden, die hier weniger als eine halbe Spalte füllen. Man braucht dabei nur an die umfangreichen Diskussionen um den Kahlschlag zu denken. Die „potentielle natürliche Vegetation“ lernt der Leser nicht als ein theoretisch wie praktisch sehr zweifelhaftes Konzept kennen, es sei denn, er würde sich durch die an- aber nicht ausgeführte Literatur ein Bild machen. Ähnlich ist es mit der Konzeption der Klimax. Die Beschreibung der Waldtypen folgt bis zu den Assoziationen, z. T. bis zu den Subassoziationen, einer in ihrer Systematik nicht näher begründeten pflanzensoziologischen Gliederung. So erfährt der Leser manche nützlichen floristischen Einzelheiten. Doch ist die mehr ökologisch orientierte Darstellung von Ellenberg, der sich allenfalls auf die höheren systematischen Einheiten stützt, dafür aber ökologischen Aspekten in der Stoffanordnung mehr Raum lässt, viel übersichtlicher.

Enttäuschend ist das Kapitel „Wald und Naturschutz“. Der die Waldbewirtschaftung betreffende Abschnitt erschöpft sich in Allgemeinplätzen. Es drängt sich etwas der Eindruck auf, weite Teile des Buches sind für Leser bestimmt, die es ohnehin nicht so genau wissen wollen. Gewiss gibt es sicherlich davon mehr, als viele Autoren es wahr haben möchten. Doch haben auch sie einen Anspruch darauf, dass ihnen kritische Fragen und offene Probleme als solche dargestellt werden. Bedauerlich ist, dass die Autoren sich fast ausschließlich auf deutschsprachige Literatur stützen. Von den mehr als 600 Quellen sind nur knapp 10 % fremdsprachige Titel. Das Buch ist mit 47 Farbbildungen ausgestattet, die überwiegend illustrativ und schön reproduziert sind. Das begründet wohl zum größten Teil den hohen Verkaufspreis.

Ernst Röhrig, Göttingen

E.J. Hentschel u. G.H. Wagner. *Wörterbuch der Zoologie*. 2004. 7., überarb. u. erw. Aufl. 603 S. Elsevier/Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. ISBN 3-8274-1479-2. 29,95 €.

Im selben Verlag sind das *Wörterbuch der Botanik* (Wagenitz, 2. Aufl. 2003) und das *Wörterbuch der Ökologie* (Schaefer, 4. Aufl. 2003, s. Forstarchiv 75. J., S. 69) erschienen. In der 7. Auflage ist das Wörterbuch der Zoologie umfassend überarbeitet und durchgängig aktualisiert worden. Dem Wörterbuch vorangestellt ist eine überaus informative „Einführung in die Terminologie und Nomenklatur“, die mit der Geschichte und den Grundlagen der zoologischen Fachsprache vertraut macht und die etymologischen Angaben bei den Stichwörtern besser verstehen hilft. Im lexikalischen Hauptteil werden nunmehr 16.500 Stichwörter (eine Erweiterung um 1.000 Stichwörter gegenüber der vorigen Auflage) wissenschaftlich und etymologisch definiert. Die Definitionen sind auf das Wesentliche begrenzt. Vertiefende und ergänzende Informationen müssen über spezielle Literatur erschlossen werden. Hierzu ist das ausführliche Literaturverzeichnis am Ende des Buches hilfreich.

Norbert Bartsch, Göttingen

LIGNA+
HANNOVER 02.-06. Mai 2005

MASCHINE + WERKSTOFF + ANWENDUNG

WELTMESSE FÜR DIE FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT

Deutsche Messe AG · Messgelände · D-30521 Hannover
Tel. 0511/89-32126 · Fax 0511/89-33126 · www.ligna.de

Deutsche Messe AG
Hannover · Germany

- Röhle, H. 1986. Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien mit dem Dachlot und durch senkrechtes Anvisieren des Kronenrandes (Hochblick-Messung). Forstarchiv 57, 67-71
- Röhle, H., Huber, W. 1985. Untersuchungen zur Methode der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen. Forstarchiv 56, 238-243
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Junk Publishers, The Hague
- Runkle, J.R. 1982. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. Ecology 63, 1533-1546
- Salminen, R., Nilson, T., Hari, P., Kaipiainen, L., Ross, J. 1983. A comparison of different methods for measuring the canopy light regime. J. Appl. Ecology 20, 897-904
- Schlünder, M. 1991. Untersuchungen zum ökosystemaren Strahlungshaushalt im Verlauf der Heide-Wald-Sukzession. Diplomarbeit Systematisch-Geobotanisches Institut Univ. Göttingen
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form. The pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. Japanese J. Ecology 14, 133-139
- Smith, H. 1994. Sensing the light environment: the functions of the phytochrome family. In: Kendrick, R.E., Kronenberg, G.H.M. (eds.) Photomorphogenesis in plants. 2. Aufl. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 377-416
- Smith, E.R., Riitters, K.H. 1994. A comparison of forest canopy transmittance estimators. Can. J. For. Res. 24, 188-192
- Stadt, K.J., Lieffers, V.J. 2000. MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands. Agric. Forest Meteorol. 102, 235-252
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., Flower-Ellis, J. 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. Tree Physiology 14, 981-995
- Sterck, F.J., Bongers, F. 2001. Crown development in tropical rain forest trees: patterns with tree height and light availability. J. Ecology 89, 1-13
- Tanner, V., Eller, B.M. 1986. Veränderungen der spektralen Eigenschaften der Blätter der Buche (*Fagus sylvatica* L.) von Laubaustrieb bis Laubfall. Allg. Forst- u. Jagdztg. 157, 108-117
- Tevini, M., Häder, D.-P. 1985. Allgemeine Photobiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Thormann, J.-J. 1996. Erfahrung mit einfachen Methoden zur Strahlungserfassung im Wald z. B. das Horizontoskop und der LAI-2000 Plant Canopy Analyser – Zusammenfassung eines Referats bei der Sektionstagung Waldbau des Vereins der deutschen Versuchsanstalten im September 1996. Deutscher Verband forstl. Versuchsanstalten – Sektion Waldbau – Jahrestagung 1996, Schopfheim-Wiechs 17.-19. September 1996
- Turnbull, M.H. 1991. The effect of light quantity and quality during development on the photosynthetic characteristics of six Australian rainforest tree species. Oecologia 87, 110-117
- Vales, D.J., Bunnell, F.L. 1985. Comparison of methods for estimating forest overstorey cover. I. Observer effects. Can. J. For. Res. 18, 606-609
- Vales, D.J., Bunnell, F.L. 1988. Relationships between transmission of solar radiation and coniferous forest stand characteristics. Agric. Forest Meteorol. 43, 201-223
- Van Pelt, R., Franklin, J.F. 2000. Influence of canopy structure on the understory environment in tall, old-growth, conifer forests. Can. J. For. Res. 30, 1231-1245
- Vanselow, K. 1943. Über die Ursachen der annähernd gleichen Massenleistung unserer Reinbestände bei verschiedener Durchforstung. Forstw. Cbl. 65, 1-13
- Vose, J.M., Sullivan, N.H., Clinton, B.D., Bolstad, P.V. 1995. Vertical leaf area distribution, light transmittance, and application of the Beer-Lambert Law in four mature hardwood stands in the southern Appalachians. Can. J. For. Res. 25, 1036-1043
- Wagner, S. 1994. Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos - Methode und Anwendung. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme Univ. Göttingen A 123
- Wagner, S. 1996. Übertragung strahlungsrelevanter Wetterinformation aus punktuellen PAR-Sensordaten in größere Versuchsanlagen mit Hilfe hemisphärischer Fotos. Allg. Forst- u. Jagdztg. 167, 34-40
- Wagner, S. 1998. Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. Agric. Forest Meteorol. 90, 103-117
- Wagner, S. 1999. Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. Sauerländer's, Frankfurt a. M.
- Wagner, S. 2001. Relative radiance measurements and zenith angle dependent segmentation in hemispherical photography. Agric. Forest Meteorol. 107, 103-115
- Wall, K. de, Dreher, G., Spellmann, H., Pretzsch, H. 1998. Struktur und Dynamik von Buchen-Douglasien-Mischbeständen in Niedersachsen. Forstarchiv 69, 179-191
- Welles, J. M. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. Remote Sensing Reviews 5, 31-43
- Whitehead, D., Edwards, W.R.N., Jarvis, P.G. 1984. Conducting sapwood area, foliage area, and permeability in mature trees of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. Can. J. For. Res. 14, 940-947
- Willert, D. v., Matyssek, R., Herppich, W. 1995. Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Wollmerstädt, J., Sharma, S.C., Marsch, M. 1992. Anteile verschiedener Dendromassekomponenten bei Fichte (*Picea abies*) und Teilmodelle zur Modifizierung von Windgeschwindigkeit und Strahlung durch Fichtenreinbestände. Forstw. Cbl. 111, 390-402
- 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
- Wright, E.F., Canham, C.D., Coates, K.D. 2000. Effects of suppression and release on sapling growth for tree species of northern, interior British Columbia. Can. J. For. Res. 30, 1571-1580
- Yokozawa, M., Hara, T. 1995. Foliage profile, size structure and stem diameter-plant height relationship in crowded plant populations. Annals of Botany 76, 271-285
- Zeibig, A. 2001. Lückenstörungsmuster eines montanen illyrischen Buchenurwaldes der Assoziation Isopyro-Fagetum im Reservat Krokavica der Borovška Gora im südwestlichen Slowenien. Diplomarbeit Fachrichtung Forstwissenschaften TU-Dresden

Buchbesprechungen

E. Schwartz. *Auf den Spuren des Oberforst- und Jägermeisters Hans Dietrich von Zanthier*. 2004. 2. erw. Aufl. 126 S. mit 48 Abb. Verlag Dr. Kessel, Oberwinter. ISBN 3-935638-43-4. 13,90 €.

Es ist das große Verdienst des renommierten Forsthistorikers Ekkehard Schwartz, in seinen Bemühungen nicht nachgelassen zu haben, trotz aller Schwierigkeiten der DDR-Mangelwirtschaft und unter den ökonomischen Zwängen, in denen auch forstgeschichtliche Veröffentlichungen in der Regel nur begrenzte Chancen für Druckmöglichkeiten haben, eine zweite Auflage zu erwirken, die den Forschungsstand von 1967 – dem Jahr der Erstveröffentlichung – mit einer Fülle neuer Informationen und Erkenntnissen deutlich verbessert und ergänzt.

Hans Dietrich von Zanthier (1717-1778) gehört zu den bedeutendsten Begründern einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Forstwirtschaft im 18. Jahrhundert. Er wirkte äußerst erfolgreich in den Harzforsten um Ilseburg und Wernigerode und gründete um 1765 in Ilseburg die erste forstliche Lehrstätte in Deutschland.

Mit Zanthier sind solche richtungsweisenden forstlichen Neuerungen verbunden wie seine „wilden Baumschulen“ im Stapelburger Revier zur Anzucht des notwendigen Pflanzenmaterials zur Aufforstung der großen minderbestockten Areale in seinem Harzer Verantwortungsbereich.

- bauliche Konsequenzen für die Behandlung von Buchen-Lärchen-Mischbeständen im Südniedersächsischen Bergland. Cuvillier Verlag, Göttingen
- Häckel, H. 1990. Meteorologie. 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart
- Hagemeier, M. 1997. Kronenstruktur und Schattenwurf verschiedener Pionier- und Schlußwald-Baumarten. Diplomarbeit Albrecht-von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften Univ. Göttingen
- Hagemeier, M. 2002. Funktionale Kronenarchitektur mitteleuropäischer Baumarten. Dissertationes Botanicae 361. J. Cramer, Berlin
- Hale, S.E. 2003. The effect of thinning intensity on the below-canopy light environment in a Sitka spruce plantation. For. Ecol. Manage. 179, 341-349
- Huth, F. 2002. Lückenstrukturen in Fichtenaltbeständen des Tharandter Waldes und ihre Bedeutung für die Naturverjüngung von *Betula pendula* (Roth.). Masterarbeit Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften TU Dresden
- Johansson, T. 1985. Estimating canopy density by the vertical tube method. For. Ecol. Manage. 11, 139-144
- Johansson, T. 1996. Estimation of canopy density and irradiance in 20- to 40-year-old birch stands (*Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth.). Trees 10, 223-230
- Kaelke, C.M., Kruger, E.C., Reich, P.B. 2001. Trade-offs in seedling survival, growth, and physiology among hardwood species of contrasting successional status along a light gradient. Can. J. For. Res. 31, 1602-1616
- Kändler, G. 1986. Die Ermittlung von Bestandesparametern als Eingangsgrößen für Interzeptionsmodelle mit Hilfe aerophotogrammetrischer Verfahren. Mitt. Forstl. Versuchs- u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg 127
- Kellomäki, S., Strandman, H. 1995. A model for the structural growth of young Scots pine crowns based on light interception by shoots. Ecological Modelling 80, 237-250
- Kershaw, J.A., Maguire, D.A. 1995. Crown structure in western hemlock, Douglas-fir, and grand fir in western Washington: trends in branch-level mass and leaf area. Can. J. For. Res. 25, 1897-1912
- Knyazikhin, Y., Kranigk, J., Miessen, G., Panfyorov, O., Vygodskaya, N., Gravenhorst, G. 1996. Modelling three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in sloping coniferous stands. Biomass and Bioenergy 11, 189-200
- Korzukhin, M.D., Ter-Mikaelian, M.T. 1995. An individual tree-based model of competition for light. Ecological Modelling 79, 221-229
- Kramer, H., Dong, P.H. 1985. Kronenanalyse und Zuwachsuntersuchungen in immissionsgeschädigten Nadelholzbeständen. Forst u. Holz. 40, 115-118
- Kranigk, J. 1996. Ein Modell für den Strahlungstransport in Fichtenbeständen. Cuvillier Verlag, Göttingen
- Krasny, M.E., DiGregorio, L.M. 2001. Gap dynamics in Allegheny northern hardwood forests in the presence of beech bark disease and gypsy moth disturbances. For. Ecol. Manage. 144, 265-274
- Kurth, W. 1999. Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken. Wissenschaftlicher Verlag, Berlin
- Küßner, R. 1999. Ein auf Strahlungsmessungen basierendes Verfahren zur Bestimmung des Blattflächenindex und zur Charakterisierung der Überschirmung in Fichtenbeständen. Forstwiss. Beitr. Tharandt 5
- Küßner, R., Mosandl, R. 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. Can. J. For. Res. 30, 440-447
- Küßner, R., Reynolds, P. E., Bell, F. W. 2000. Growth responses of *Picea mariana* seedlings to competition for radiation. Scand. J. For. Res. 15, 334-342
- Landsberg, J.J., Gower, S.T. 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press, San Diego
- Larcher, W. 1994. Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 5. Aufl. Ulmer, Stuttgart
- 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
- Marshall, J.D., Waring, R.H. 1986. Comparison of methods of estimating leaf-area index in old-growth douglas-fir. Ecology 67, 975-979
- Mawson, J.C., Thomas, J.W., Degraff, R.M. 1976. Programm HTVOL. The determination of tree crown volume by layers. USDA For. Serv. Res. Pap. NE-354
- McCready, R.L., Jokela, E.J. 1998. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected Loblolly Pine families. Forest Science 44, 64-72
- Messier, C., 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
- 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
- Mitchell, A.K. 2001. Growth limitations for conifer regeneration under alternative silvicultural systems in a coastal montane forest in British Columbia, Canada. For. Ecol. Manage. 145, 129-136
- Mitscherlich, G., Künstle, E., Lang, W. 1967. Ein Beitrag zur Frage der Beleuchtungsstärke im Bestande. Allg. Forst- u. Jagdztg. 138, 213-223
- Mosandl, R. 1984. Löcherhiebe im Bergmischwald. Forstl. Forschungsber. München 61
- Mosandl, R. 1991. Die Steuerung von Waldökosystemen mit waldbaulichen Mitteln – dargestellt am Beispiel des Bergmischwaldes. Mitt. Staatsforstverwaltung Bayern 46
- Muleo, R., Tellini, A., Masetti, C., Morini, S. 1993. Low cost sensors to measure solar radiation in woody plant communities. Adv. Hort. Sci. 7, 117-121
- Müller, K.H. 2003. Lückendynamik in Fichtenreinbeständen des Erzgebirges. Dissertation TU Dresden
- Münch, D. 1995. Bestandesdynamik von Naturwaldreservaten. Eine Dauerbeobachtung in Luftbildzeitreihen. Dissertation Univ. Freiburg
- 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. Func. Ecology 15, 798-803
- Neumann, H.H., Den Hartog, G., Shaw, R.H. 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. Agric. Forest Meteorol. 45, 325-345
- Newman, S.M. 1985. Low cost sensor integrators for measuring the transmissivity of complex canopies to photosynthetically active radiation. Agric. For. Meteorol. 35, 243-254
- Nicotra, A.B., Chazdon, R.L., Iriarte, S.V. 1999. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. Ecology 80, 1908-1926
- Nilsson, U., Gemmel, P., Johannsson, U., Karlsson, M., Welander, T. 2002. Natural regeneration of Norway spruce and birch under Norway spruce shelterwood of varying densities on a mesic-dry site in southern Sweden. For. Ecol. Manage. 161, 133-145
- Nüßlein, S. 1995. Struktur und Wachstumsdynamik jüngerer Buchen-Edellaubholz-Mischbestände in Nordbayern. Forstl. Forschungsber. München 151
- Oker-Blom, P. 1986. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands. Acta Forestalia Fennica 197
- Oker-Blom, P., Kellomäki, S. 1982. Effect of angular distribution of foliage on light absorption and photosynthesis in the plant canopy: theoretical computations. Agricultural Meteorology 26, 105-116
- Oker-Blom, P., Kellomäki, S. 1983. Effect of grouping of foliage on the within-stand and within-crown light regime: comparison of random and grouping canopy models. Agricultural Meteorology 28, 143-155
- Pearcy, R.W., Ehleringer, J., Mooney, H.A., Rundel, P.W. 1989. Plant physiological ecology. Chapman and Hall, London, 109-113, 301-325
- Pommerening, A., Biber, P., Stoyan, D., Pretzsch, H. 2000. Neue Methoden zur Analyse und Charakterisierung von Bestandesstrukturen. Forstw. Cbl. 119, 62-78
- Pontailleur, J.-Y. 1990. A cheap quantum sensor using a gallium arsenide photodiode. Func. Ecology 4, 591-596
- Pretzsch, H. 1992. Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. Allg. Forst- u. Jagdztg. 163, 203-213
- Pretzsch, H. 1993. Analyse und Rekonstruktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. Sauerländer's, Frankfurt a. M.
- Pretzsch, H. 1997. Analysis and modeling of spatial stand structure. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. For. Ecol. Manage. 97, 237-253
- 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. Forest Meteorol. 65, 107-127

Zusammenhang zwischen dem Überschirmungsgrad und dem Anteil durch den Kronenraum transmittierter Strahlung her zu stellen. Eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse ist nicht gegeben. Eine Studie, in der es gelang, einen Zusammenhang zwischen verschiedenen transmittierten Strahlungskomponenten und Bestandesparametern herzustellen, haben Vales und Bunnell (1985, 1988) vorgestellt. Einen Vergleich von visuellen Überschirmungsansprachen mit Ergebnissen der hemisphärischen Photographie und der Bestandesgrundflächenbestimmung publizierten Brandeis et al. (2001). Sie kommen zu dem Schluss, dass eine visuelle Schätzung der Überschirmung einer gemessenen Strahlungsgröße dann ebenbürtig oder sogar vorzuziehen ist, wenn der Zweck der Überschirmungsansprache darin besteht, einen Schätzer für das Verjüngungswachstum bereitzustellen. Ähnlich argumentieren Bebbler et al. (2002), die neben der Verwendung eines *Plant Canopy Analyser* zur Abschätzung des Lichtgenusses von Verjüngungspflanzen mit Kronenöffnungsklassen arbeiteten. Eine Untersuchung zur Schätzung des Lichtklimas in einem Birkenbestand durch Bestandesparameter haben Comeau und Heineman (2003) vorgestellt. Des Weiteren sei auf die Möglichkeiten hingewiesen, Informationen über Kronenraumstrukturen nicht-terrestrisch, sondern mit Methoden der Fernerkundung (Luftbild, Satellitenbilder) zu erheben (Münch 1995, AFL 1998, AFL 2003).

Literatur

- AFL 1998. Luftbild-Interpretationsschlüssel, Bestimmung der natürlichen Altersklasse von Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. LÖBF-Mitteilungen, Nr. 1, 45-50
- AFL 2000. Protokoll der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpretation. Tagung vom 16.-18.10.2000 in Nesslau/Schweiz
- AFL 2003. Luftbild-Interpretation, Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. Schriftenr. Landesforstpräsidium Sachsen 26
- Ammer, C. 2000. Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft, Shaker Verlag, Aachen
- Ammer, C., Krötz, G. 1997. Ecological light measurement in forests using the light degradation effect in hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H). *Annales des Sciences Forestières* 54, 539-552
- Baldocchi, D., Collineau, S. 1994. The physical nature of solar radiation in heterogeneous canopies: spatial and temporal attributes. In: Caldwell, M.M., Pearcy, R.W. (Hrsg.) *Exploitation of environmental heterogeneity by plants: ecophysiological process above and below ground*. Academic Press, San Diego, 21-71
- Bardon, R.E., Countryman, D.W., Hall, R.B. 1995. A reassessment of using light-sensitive diazo paper for measuring integrated light in the field. *Ecology* 76, 1013-1016
- Battles, J.J., Fahey, T.J. 2000. Gap dynamics following forest decline: a case study of red spruce forests. *Ecol. Applications* 10, 760-774
- Bebbler, D., Brown, N., Speight, M., Moura-Costa, P., Wai, Y.S. 2002. Spatial structure of light and dipterocarp seedling growth in a tropical secondary forest. *For. Ecol. Manage.* 157, 65-75
- Brandeis, T.J., Newton, M., Cole, E. 2001. A comparison of overstorey density measures for describing understorey conifer growth. *For. Ecol. Manage.* 152, 149-157
- Brown, M.J., Parker, G.G. 1994. Canopy light transmittance in a chronosequence of mixed-species deciduous forests. *Can. J. For. Res.* 24, 1694-1703
- Brunner, A. 1993. Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen und eine Methodenstudie zur ökologischen Lichtmessung im Wald. *Forstl. Forschungsber. München* 128, 217
- Brunner, A. 1994. Ökologische Lichtmessung im Wald. *Forstarchiv* 65, 133-138
- Burger, H. 1953. Holz, Blattmenge und Zuwachs. Fichten im gleichaltrigen Hochwald. XIII. Mitt. Schweiz. Anstalt forstl. Versuchswesen 29, 38-130
- Campbell, G.S., Norman, J.M. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. In: Russell, G., Marshall, B., Jarvis, P.G. (eds.) *Plant canopies: Their growth, form and function*. Cambridge University Press, Cambridge, 1-19
- 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
- Chartier, M., Bonchretien, P., Allirand, J.M., Gosse, G. 1989. Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie* 9, 281-284
- Chen, J.M., Black, T.A., Price, D.T., Carter, R.E. 1993. Model for calculating photosynthetic flux densities in forest openings on slopes. *J. Appl. Meteor.* 32, 1656-1665
- Chen, J.M., Rich, P.M., Gower, S.T., Norman, J.M., Plummer, S. 1997. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *J. Geophys. Res.* 102, 429-443
- Claveau, Y., Messier, C., Comeau, P.G., Coates, K.D. 2002. Growth and crown morphological responses of boreal conifer seedlings and saplings with contrasting shade tolerance to a gradient of light and height. *Can. J. For. Res.* 32, 458-468
- Clearwater, M.J., Nifinluri, T., Gardingen, P.R. van 1999. Forest fire smoke and a test of hemispherical photography for predicting understorey light in Bornean tropical rain forest. *Agric. Forest Meteorol.* 97, 129-139
- Coates, K.D. 2002. Tree recruitment in gaps of various size, clearcuts and undisturbed mixed forest of interior British Columbia, Canada. *For. Ecol. Manage.* 155, 387-398
- Coates, K.D., Burton, P.J. 1999. Growth of planted tree seedlings in response to ambient light levels in northwestern interior cedar-hemlock forests of British Columbia. *Can. J. For. Res.* 29, 1374-1382
- Collet, C., Lanter, O., Pardos, M. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. *Ann. For. Sci.* 58, 127-134
- Comeau, P.G., Heineman, J.L. 2003. Predicting understorey light microclimate from stand parameters in young paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) stands. *For. Ecol. Manage.* 180, 303-315
- Dohrenbusch, A. 1987. Kann die „relative Beleuchtungsstärke“ die Lichtverhältnisse im Wald zuverlässig charakterisieren?. *Forstarchiv* 58, 24-27
- Dohrenbusch, A. 1995. Überlegungen zur Optimierung der Strahlungsmessung im Wald. *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 166, 109-114
- Dohrenbusch, A., Grote, R., Fritz, H.W. 1993. Struktur und Wachstum eines Fichtenbestandes unter experimenteller Manipulation der Stoffeinträge. *Forstarchiv* 64, 172-177
- Dubrasich, M.E., Hann, D.W., Tappeiner II J.C. 1997. Methods for evaluating crown area profiles of forest stands. *Can. J. For. Res.* 27, 385-392
- Eber, W. 1972. Über das Lichtklima von Wäldern bei Göttingen und seinen Einfluß auf die Bodenvegetation. *Diss. Univ. Göttingen*
- Eimern, J. van, Ehrhardt, O. 1985. Zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Strahlung und Temperatur an der Boden- und Kronenoberfläche eines Buchenwaldes. *Forstarchiv* 56, 181-186
- Ellenberg, H. 1996. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. 5. Aufl. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Frech, A., Leuschner, C., Hagemeier, M., Hölscher, D. 2003. Nachbarschaftsbezogene Analyse der Kronenraumbesetzung von Esche, Hainbuche und Winterlinde in einem artenreichen Laubmischwald (Nationalpark Hainich, Thüringen). *Forstw. Cbl.* 122, 22-35
- Friend, D.T.C. 1961. A simple method of measuring integrated light values in the field. *Ecology* 42, 577-580
- Fröhlich, M., Quednau, H.D. 1995. Statistical analysis of the distribution pattern of natural regeneration in forests. *For. Ecol. Manage.* 73, 45-57
- Gadow, K. v. 1999. Waldstruktur und Diversität. *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 170, 117-122
- Gaffrey, D., Saborowski, J. 1999. RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen I - Schätzung von Nadel- und Asttrockenmasse bei 66jährigen Douglasien. *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 170, 177-183
- Gray, A.N., Spies, T.A., Easter, M.J. 2002. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Can. J. For. Res.* 32, 332-343
- Guericke, M. 2001. Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua* Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell: Versuchsflächenanalyse, Modellparametrisierung und wald-

bildung der Kronenraumstruktur ermöglicht es des Weiteren, für bestimmte Baumarten oder soziologische Klassen den Anteil der Kronenschirmfläche zu bestimmen, der nicht von anderen Bäumen überschirmt ist (Nüßlein 1995, S. 119). Der Grad der Überschirmung (einfach oder mehrfach) ist – ebenfalls für bestimmte Baumarten oder soziologische Klassen – in der Horizontalprojektion für verschiedene Bestandeshöhen ebenso quantifizier- und darstellbar wie im Vertikalprofil (vgl. Nüßlein 1995, S. 125f.). Werden die Kronenschirmflächen aller Bäume auf eine Höhe von 0 m (= Erdoberfläche) projiziert, so ergibt sich der Überschirmungsgrad als „... das Verhältnis der bei horizontaler Kronenprojektion durch die Baumkronen bedeckten Fläche zur gesamten Bestandesfläche ...“ (Vanselow 1943). Der Überschirmungsgrad erreicht theoretisch einen Maximalwert von 1. Alternativ zur Erfassung des Überschirmungsgrades anhand der Kronenkennwerte von Einzelbäumen kann im einfachsten Fall ein Punktrasterverfahren (Johansson 1985) angewandt werden. Ebenso ist es möglich, den Überschirmungsgrad luftbildgestützt zu schätzen (Kändler 1986), wobei die Informationsdichte und die Interpretationsmöglichkeiten aufgrund fehlender Aussagen über die Vertikalstruktur von Kronenräumen oder die Mehrfachüberschirmung in unterschiedlichen Höhenbereichen eingeschränkt sind. Basierend auf den oben erwähnten positionsabhängigen Kronenraummodellen, kann zudem die Verteilung des Kronenvolumens in bestimmten Höhenschichten ermittelt und eine Art „Raumnutzungsweiser“ (vgl. Nüßlein 1995, S. 131) abgeleitet werden.

Für waldbauliche Fragestellungen sind nicht nur Informationen über den von Kronenkompartimenten eingenommenen Raum wichtig; häufig ist es sinnvoll, den Anteil, die Größe oder die Anordnung von „Räumen“ zu beschreiben und zu quantifizieren, die von Kronenkompartimenten „unbesetzt“ sind. Solche „unbesetzten Kronenräume“ können sich innerhalb von Kronen wie auch zwischen den Kronen benachbarter Bäume befinden.

Eine Erfassung ast-, zweig- und blatt- bzw. nadelfreier Kroneninnenräume oder kronenfreier Baumzwischenräume setzt eine genaue Definition der zu erfassenden Zielgrößen voraus. Über Kronenablotungen lassen sich Kronenzwischenräume hinreichend präzise erfassen und der nicht überschirmte Flächenanteil als einfache Schätzgröße berechnen. Für bestimmte Fragestellungen, beispielsweise im Rahmen der Waldverjüngungsforschung oder der Waldinventur, sind jedoch nur Kronenzwischenräume bestimmter Mindestgröße oder einer bestimmten Form relevant. Kronenzwischenräume, die bestimmte Anforderungen in Hinsicht auf konkrete Fragestellungen erfüllen und dabei Mindestgrößen oder bestimmte räumliche Ausformungen aufweisen, werden zumeist als Lücken bezeichnet. Dieser Begriff ist bislang nicht einheitlich definiert. Zur Diskussion des Begriffes und seiner Verwendung haben Zeibig (2001), Huth (2002) und Müller (2003) Literatur zusammengetragen. Hier finden sich auch viele Hinweise zu Lückenhäufigkeiten und ihrer mathematisch-statistischen Behandlung, die wesentlich von Runkle (1982) geprägt wurden und z. B. in der Arbeit von Krasny und DiGregorio (2001) verwendet werden. Immer wieder genutzte Kriterien sind der Durchmesser der Lücke im Verhältnis zum Kronendurchmesser von Randbäumen oder im Verhältnis zur Baumhöhe der herrschenden Bestandesschicht, aber auch absolute Mindestgrößen (Durchmesser und Quadratmeter). Des Weiteren wird darauf geachtet, in welchem Umfang in eine Kronendachlücke bereits eine zweite Bestandesschicht eingewachsen ist. Obwohl hier von Kronendachlücken gesprochen wird, sollte erwähnt werden, dass auch die so genannte „erweiterte

Lücke“ (*expanded gap* sensu Runkle 1982) Gegenstand der Untersuchungen ist, die durch die Baumstandpunkte von Lückenrandbäumen und nicht durch die Kronenränder (*canopy gap*) begrenzt ist. Bisher nicht angewendet, aber für ökologische Untersuchungen sehr relevant dürfte die Definition anhand klimatologischer Gradienten sein.

In jüngerer Zeit hat der Arbeitskreis Forstlicher Luftbildinterpretieren (AFL 2000) eine Definition geliefert, die jedoch für differenziertere terrestrische Untersuchungen nicht ausreicht.

2.2.2 Indirekte Methoden Einzelbaumuntersuchungen

Allometrische Methoden¹ stellen Beziehungen zwischen solchen Einzelbaumparametern auf, die schwierig oder zeitaufwendig zu erheben sind, und solchen, deren Erfassung mit geringerem Aufwand zu bewerkstelligen ist (Campbell und Norman 1989). In diesem Sinne ist das Modellieren von Baummerkmalen wie Baumhöhe, Kronenansatzhöhe oder Kronenbreite in Beziehung zu dem Brusthöhendurchmesser (BHD) dieser indirekten Methode zuzurechnen.

Zur Schätzung der Blattfläche oder der Blattbiomasse von einzelnen Ästen werden i. d. R. allometrische Funktionen verwendet, die auf der Prädiktorvariablen Astbasisdurchmesser (Kershaw u. Maguire 1995, Küßner 1999) aufbauen. Über die Häufigkeitsverteilung aller Astbasisdurchmesser eines Baumes kann anschließend die Zielgröße (Blattfläche, Blattbiomasse) kalkuliert und in Beziehung zu einem einfacher zu erhebenden Parameter (z. B. Wurzelhalsdurchmesser, BHD) gesetzt werden. Ebenso können diese Zielgrößen auf die Splintfläche bezogen werden (z. B. Marshall u. Waring 1986, Stenberg et al. 1994). Diesen Überlegungen liegt die so genannte *pipe model theory* zugrunde (Shinozaki et al. 1964). Eine elegante Methode auf Stichprobenbasis zur Erhebung der notwendigen Daten beschreiben Gaffrey und Saborowski (1999). Whitehead et al. (1984) integrierten darüber hinaus baumartenspezifische Merkmale in solche Modelle, um die Schätzgenauigkeit zu erhöhen.

Bestandesbezogene Untersuchungen

Indirekte Verfahren zur Beschreibung der Kronenraumstruktur basieren meistens auf allometrischen Verfahren oder auf der Erfassung von Umweltparametern, die durch die Kronen modifiziert werden. Im Umkehrschluss wird dann von der Ausprägung der Umweltparameter auf die Kronenraumstruktur geschlossen (vgl. Abschnitt 1.3 und Abschnitt 1.6).

Auf Bestandesebene können Dendromassekomponenten oder der Blattflächenindex in Abhängigkeit von Einzelbaumparametern aller Bäume wie dem Brusthöhendurchmesser (Burger 1953, Wollmerstädt et al. 1992) oder der Splintfläche (Whitehead et al. 1984, Stenberg et al. 1994) geschätzt werden (allometrische Schätzverfahren).

Weitere indirekte Verfahren beruhen auf Strahlungsmessungen, die anhand der Strahlungsverringerung (Strahlungsextinktion) durch den Bestand Rückschlüsse auf einzelne Parameter der Kronenraumstruktur (wie z. B. den Blattflächenindex oder die Blattdicke) erlauben (Ross 1981, Oker-Blom 1986, Campbell u. Norman 1989, Welles 1990, Chen et al. 1997, Küßner 1999, Küßner u. Mosandl 2000).

Mehrere Autoren (z. B. Mosandl 1991, Johansson 1996, Küßner 1999) versuchten in Misch- oder Reinbeständen einen

¹Im engeren Sinne bezeichnet Allometrie „das Verhältnis der relativen Wachstumsgeschwindigkeiten zweier Wachstumsgrößen“ (Wenk, G., Antanaitis, V., Šmelko, Š. 1990. Waldertragslehre. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin. 448 S.)

Strahlungsprofile können wertvolle Hinweise auf die Bedeutung von Kronenraumstrukturen (Lückenbildung, Strahlungsextinktion) für ökologische Zusammenhänge geben (Mitscherlich et al. 1967, Yokozawa u. Hara 1995, Vose et al. 1995, Van Pelt u. Franklin 2000). Darüber hinaus ist die Struktur des Kronenraumes ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Habitatqualität für eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten (Dubrasich et al. 1997). Arbeiten, in denen die Kronenraumstruktur im Rahmen allgemeinerer Bestandesstrukturbetrachtungen erwähnt wird, sind z. B. die von Fröhlich und Quednau (1995), Gadow (1999), Pommerening et al. (2000), Pretzsch (1997) und Wall et al. (1998).

Parameter, die die Kronenraumstruktur eines Einzelbaumes oder eines Waldbestandes beschreiben, können über direkte oder indirekte Methoden erfasst und quantifiziert werden.

2.2 Methoden

2.2.1 Direkte Methoden

Einzelbaumuntersuchungen

Im forstlichen Versuchswesen wird die Krone häufig als der Bereich des Baumes definiert, der in der vertikalen Ausdehnung durch den Kronenansatz und die Baumspitze eingegrenzt wird. In der horizontalen Ausdehnung bestimmen die Astspitzen die äußeren Grenzen der Krone. Für viele Untersuchungszwecke reicht eine Beschreibung der Krone hinsichtlich ihrer Dimension und Form aus; weitergehende Untersuchungen befassen sich darüber hinaus mit der räumlichen Anordnung einzelner Kronenkompartimente (Blätter/Nadeln, Äste, Zweige, Stamm im Kronenbereich). Die letztgenannten Untersuchungen sind Gegenstand eines eigenen Forschungszweiges, der Phytometrie (Ross 1981). Detaillierte Hinweise zur Erfassung phytometrischer Parameter in Bezug auf Blätter bzw. Nadeln finden sich bei Ross (1981), Campbell und Norman (1989), Kellomäki und Strandman (1995) sowie Kranigk (1996). In jüngerer Zeit sind sehr detaillierte Kronendarstellungen bis auf Einzelnadelebene gelungen, die ebenfalls eigene Methoden erfordern (Kurth 1999).

Die Kronendimension von Einzelbäumen kann anhand einer Reihe von Parametern erfasst und beschrieben werden. Der Kronenansatz wird für Laubbäume i. d. R. durch den ersten lebenden Primärast bestimmt (z. B. Nüßlein 1995); bei Nadelbäumen wird entweder eine Definition analog derjenigen für Laubbäume angewendet oder der erste Astquirl mit mindestens drei lebenden Primärästen als Kronenansatz definiert (z. B. Dohrenbusch et al. 1993). Durch diese Begriffsfassungen werden Sekundäräste von der Krone ausgeschlossen, obwohl sie einen Teil des Assimilationsapparates tragen und somit im biologischen Sinne zur Krone zählen. Steiläste und Zwiesel werden nur dann als Kronenansatz berücksichtigt, wenn sie Primärastcharakter haben. Im Vertikalaufbau wird die Krone vereinfachend in eine Lichtkrone (Kronenbereich oberhalb der größten Horizontalausdehnung) und eine Schattenkrone unterteilt. In ihrer horizontalen Ausdehnung wird eine Krone im einfachsten Fall radialsymmetrisch dargestellt und durch ihren mittleren Kronenradius beschrieben; der mittlere Kronenradius wird in der Höhe der Krone ermittelt, in der diese ihre maximale Horizontalausdehnung aufweist. Die Dachlot-Methode (Röhle 1986) ist hierbei ein Standardverfahren zur Messung von Kronenradien. Aus dem mittleren Kronenradius lässt sich diejenige Fläche (in m²) berechnen, die die Krone in der Horizontalprojektion über der Bodenoberfläche einnimmt (Kronenschirmfläche). Die Berechnung der Kronenschirmfläche aus einem mittleren Radius ist bei der im Allgemeinen

unregelmäßigen Kronenform ungenau. Eine Bewertung unterschiedlicher Methoden zur Messung von Kronenradien bzw. zur Schätzung der Kronenschirmfläche führten Röhle (1986), Röhle und Huber (1985) sowie Kramer und Dong (1985) durch.

Weitere Kennmaße zur Beschreibung der Form und Größe von Kronen sind beispielsweise Bekronungsgrad (Kronenlänge/Baumhöhe), Spreitungsgrad (Kronenbreite/Baumhöhe), Plumpheitsgrad (Kronenbreite/Kronenlänge), Ausladungsverhältnis (Kronenbreite/ Stammdurchmesser (BHD)).

Die Kronenform von Bäumen ist im Wesentlichen durch artspezifische Eigenschaften (z. B. monopodiales – sympodiales Wachstum), das Alter und die Nachbarschaftsbeziehungen der Bäume untereinander bestimmt. Sie kann mit Hilfe geometrischer Modelle nachgebildet werden. Für die Abbildung von Kronen junger Nadelbäume wurde beispielsweise eine Kegelform (Küßner et al. 2000) angenommen. Im Waldwachstums-Simulationsprogramm BWinPro wird die Kronenmantelfläche anhand eines apolonischen Paraboloids berechnet (BWinPro 6.0 Online-Handbuch). Pretzsch (1993) legt bei der Modellierung von Buchen- oder Lärchenkronen Kronenformmodelle zugrunde, die sich für den Bereich der Lichtkrone aus einem Paraboloid und für den Bereich der Schattenkrone aus einem Kegelstumpf zusammensetzen. Weitere geometrische Modelle sind in Mawson et al. (1976) beschrieben. Alle diese Modelle werden bislang gleichbleibend für eine Baumart (mit Übergang von Licht- zu Schattenkrone in einer fixen relativen Kronenhöhe) über das gesamte Baumleben verwendet, wobei allein die Dimension, nicht aber die Form variiert. Eine Erweiterung stellt daher der z. B. von Pretzsch (1992) und Guericke (2001) verfolgte Ansatz dar, die Kronenform dynamisch zu simulieren. Erste, sehr gründlichen Untersuchungen zur Erfassung und Verteilung der Biomasse in Kronen hat Burger (1953) mitgeteilt.

Bestandesbezogene Untersuchungen

Bestandesbezogene Untersuchungen zur Kronenraumstruktur müssen Form und Dimension von Kronen sowie deren Anordnung im Raum (Verteilung) berücksichtigen.

Die Kronenraumstruktur von Waldbeständen wird in der Regel in der horizontalen Ebene oder im vertikalen Aufriss erfasst und dargestellt.

Ein Beispiel zur ansatzweisen Erfassung der Vertikalstruktur von Kronen auf Bestandesebene ist die Darstellung von Baumzahl-Höhen-Verteilungen (z. B. Nüßlein 1995, Wall et al. 1998), bei der die Bäume entsprechend der von ihnen erreichten Höhe in Höhenstraten eingeteilt werden. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist jedoch, dass die vollständige Position der Krone dabei unberücksichtigt bleibt; so kann sich der Kronenansatz in einem anderen Höhenstratum befinden als die Baumspitze. Detailliertere Informationen liefern dagegen einzelbaumbezogene positionsabhängige Kronendaten. Aus solchen Daten können Informationen darüber gewonnen werden, inwieweit Kronen benachbarter Bäume miteinander Kontakt haben oder sogar ineinander greifen. Nüßlein (1995) quantifiziert am Beispiel stark strukturierter Buchen-Edellaubbaum-Mischbestände die Kronenüberschneidung von Bestandesnachbarn im Raum; Frech et al. (2003) nutzen solche Informationen zur Konkurrenzaussagen. Um die dreidimensionale Kronenüberschneidung realitätsgetreu erfassen zu können, sind die Erhebung von Baumpositionen, Kronenmerkmalen (Kronenansatzhöhe, Baumhöhe, Kronenradien in Höhe der größten Horizontalkronenausdehnung) sowie die Modellierung der Kronenform notwendig. Eine solche modellhafte Ab-

Ein weiteres großes Problem ist dadurch gegeben, dass Momentanmessungen im engeren Sinne nur Strahlungswerte für die diffuse Strahlungskomponenten liefern. Ausschließlich die hemisphärische Fotografie liefert aus Momentanaufnahmen auch Aussagen zur direkten Strahlung. Solche Aussagen können – wenngleich aus Strahlungsmodellen abgeleitet – in Kombination mit einem Langzeit-Referenzsensor auch an die aktuelle Witterung angepasste Strahlungswerte liefern (Rich et al. 1993, Wagner 1996, Clearwater et al. 1999). Der rechnerische Aufwand dafür ist aber zu bedenken.

1.5.2 Permanentmessungen

Diese Messungen stellen sicherlich das Optimum an Exaktheit – zumal wenn frisch kalibrierte PAR-Sensoren Verwendung finden – und Anpassbarkeit an die Photosynthese dar (Dohrenbusch 1995). Die Dauer der Permanentmessungen darf jedoch keinesfalls zu kurz sein. Dass selbst perfekt synchronisierte, integrierte 30 bis 60 Minuten-Messungen zu Schwankungen der Werte der relativen Strahlung einzelner Messpunkte im Wald im Verhältnis zu echten Freiflächenmessungen führen, zeigen Smith und Riitters (1994). Die von ihnen ermittelten Relativwerte schwanken (für einen einzelnen Messpunkt) zwischen 3,1 und 9,6 %. Gründe dafür sind unterschiedliche Sonnenhöhenwinkel zur Zeit der Messungen und unterschiedliche Bewölkungssituationen zur Zeit der Messungen in Kombination mit unregelmäßigen Bestandsstrukturen (Lücken). Solche „Repräsentativmessungen“ sind demnach nicht geeignet, und die Messperioden müssen also deutlich länger sein. An welche Zeiträume zu denken ist, kann nicht generell angegeben werden; Wochenwerte mögen i.d.R. ausreichend sein. Auch hier gilt, dass die Dauer umso länger sein muss, je aufgelichteter die Bestände sind.

1.6 Hinweise auf Strahlungsmodelle

Wie bereits unter 1.3 ausgeführt, ergibt sich die aktuelle Strahlungssituation im Wald aus der Kombination der Strahlungssituation oberhalb von Waldbeständen mit den Abwandlungen der Strahlung durch den Bestand. Die in die Bemühungen (vgl. z. B. Chen et al. 1993), das Strahlungsgeschehen in Waldbeständen zu modellieren, einfließenden Informationen zur Wirkung des Bestandes lassen sich daher auch auf die bereits erwähnten Faktoren (Abschnitte 1.3.1 bis 1.3.4) zurückführen. Die folgende, als „Markov-Modell“ bezeichnete Funktion (Neumann et al. 1989) stellt das derzeit am meisten benutzte Konzept dar:

$$I(\Theta) = e \left(\frac{g(\Theta, \alpha) \cdot \Omega \cdot LAI \cdot f(\alpha)}{\cos(\alpha)} \right)$$

Tatsächlich werden allerdings oft auch einfachere Varianten dieses Modells benutzt, bei denen einzelne Variablen unberücksichtigt bleiben (z. B. Beer-Lambert-Funktion; Larcher 1994). Das ist dann akzeptabel, wenn nicht genügend Vorwissen vorhanden ist oder unter sehr einheitlichen Bedingungen – z. B. hinsichtlich der Baumart und der Bestandsstrukturen – gearbeitet wird (McCrary u. Jokela 1998).

Nach dem Markov-Modell ist die im Waldbestand gemessene Strahlung (I) wesentlich vom Zenitwinkel der einfallenden Strahlung (Θ) abhängig. Darüber hinaus spielt die Gesamtblattfläche (LAI) eine wesentliche Rolle. Es können Blattklumpungen (Oker-Blom u. Kellomäki 1983) die Strahlungsabschirmung in einzelnen Zenitwinkeln systematisch unterschiedlich beeinflussen. Der Klumpungsindex wird durch

‘ Ω ’ angegeben. Die unterschiedlich geeigneten Blattflächenanteile der Gesamtblattfläche (LAI) werden mit ‘ $f(\alpha)$ ’ angegeben. Die Funktion $g(\Theta, \alpha)$ wird als Projektionsfunktion für die Einheitsblattfläche betrachtet, die vom Einfallswinkel der Strahlung (Θ) und vom Blattneigungswinkel (α) abhängt; sie gibt einen Extinktionskoeffizienten aus, der die Abschwächung des Strahlungsstroms beim Durchgang des Bestandes beschreibt.

Wegen der multiplikativen Verknüpfung einzelner Faktoren, ist eine sichere Schätzung aller erwähnten Bestandesparameter aus einfachen Strahlungsmessungen im Bestand grundsätzlich nicht möglich (vgl. aber Abschnitt 2).

Um von den punktuellen Strahlungsmessungen zu flächhaften Aussagen und zu Aussagen für nicht explizit gemessene Positionen (z. B. in mehreren Metern über dem Waldboden) zu kommen, werden diese Strahlungsmodelle noch mit Stammverteilungsplänen und Modellen zur Kronenraumstruktur (auch Kronenform) kombiniert. Die daraus resultierenden Bestandesstrahlungsmodelle werden als sehr komplexe Computerprogramme betrieben (Knyazikhin et al. 1996, Korzukhin u. Ter-Mikaelian 1995) und teilweise auch angeboten (Stadt u. Lieffers 2000), im Deutschsprachigen namentlich TRAYCI von Brunner (1998). Die unabhängige Bestimmung der Parameterwerte der einfließenden Größen bereitet oft Schwierigkeiten, so dass die Anpassung der Modelle an die jeweils gegebene Bestandessituation oft iterativ seitens der Modellierer erfolgen muss. Die Anpassungen sind oftmals gut.

2 Kronenraumstruktur

2.1 Einführung

Unter Kronenraumstruktur wird die räumliche Anordnung der Blätter/Nadeln, Zweige und Äste (als den Kronenkompartimenten) und der Gesamtheit aller Kronenkompartimente auf Einzelbaum- oder Bestandesebene verstanden. Der Begriff der „Kronenraumstruktur“ ist nicht deckungsgleich mit dem im englischsprachigen Raum verwendeten Begriff *plant canopy structure*: Dieser ist definiert als „the spatial arrangement of the above-ground organs of plants in a plant community“ (Campbell u. Norman 1989) und entspricht eher dem deutschsprachigen Begriff der Bestandesstruktur.

Die Erfassung und Beschreibung der Kronenraumstruktur sind wesentlicher Bestandteil ökologischer wie auch waldbaulicher Untersuchungen, da sich im Kronenraum u. a. wichtige pflanzenphysiologische Prozesse vollziehen, die wiederum die Entwicklung von Bäumen (z. B. Wachstum, Mortalität) beeinflussen. Für waldbauliche Fragestellungen sind Informationen über die Kronenraumstruktur darüber hinaus von Bedeutung, da der Kronenraum seine physikalische Umwelt (z. B. Licht, Temperatur) beeinflusst und damit sowohl die Bedingungen für seine eigene Regeneration (Waldverjüngung) als auch die Bedingungen für die Entwicklung anderer Pflanzen- und Tiergruppen (z. B. Bodenlebewesen) modifiziert. Eber (1972) erfasste das horizontale Strahlungsmuster in Waldbeständen und verglich dieses mit der Ausbildung der Bodenvegetation. Nicotra et al. (1999) haben in Beständen unterschiedlicher Behandlung die Häufigkeitsverteilungen der Lichtflecken mit denen der Kronenraumlücken verglichen. Vertikale Strahlungsprofile werden u. a. in der Konkurrenzforschung aufgestellt, um die Verfügbarkeit der Ressource Strahlung, die sich in Abhängigkeit von der Kronenraumstruktur ändert, für einzelne Bäume zu quantifizieren (Wagner 1999, Küßner et al. 2000).

Eine Differenzierung in direkte und diffuse Strahlungsanteile ist dabei jedoch nicht möglich. Letzteres gilt auch für die im Bereich der gesamten PAR mit guter Genauigkeit messenden Verfahren, die amorphe Siliciumzellen (vgl. Chartier et al. 1989, Muleo et al. 1993, Ammer u. Krötz 1997) oder Gallium-arsenid-Photodioden (Pontailler 1990) verwenden. Die wenigsten dieser alternativen Methoden sind jedoch auf dem Markt erhältlich. Ihr Einsatz wird sich daher auf besondere Messaufgaben beschränken und ist an die Anbindung zu den Entwicklern gebunden. Ebenfalls nur eingeschränkt verfügbar sind Sensoren, die für Messungen des R/FR-Verhältnisses der Strahlung geeignet sind. Woodward (1983) sowie Méthy et al. (1987) haben solche Messgeräte beschrieben.

1.5 Hinweise zur Durchführung von Strahlungsmessungen

1.5.1 Momentanmessungen

Momentanmessungen dürfen nur bei gut zu standardisierenden Witterungsbedingungen und daher ohne Einfluss von direkter Strahlung durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 1.3.6, 1.b). Die ideale Situation ist der homogen bedeckte Himmel (Lieffers et al. 1999). Bei solcher Witterung ist auch die räumliche Trennung zwischen Referenzsensor und Messpunkt im Bestand ein geringes Problem, wenn die Distanz zwischen beiden nur wenige 100 m betrifft. Diese Situation ist jedoch – je nach Jahreszeit und Region (Abschnitt 1.2.4) – nicht allzu häufig. Abweichungen von dieser Witterungssituation, von der vor allem Messungen mit sommergrünen Laubbäumen betroffen sind, liefern insbesondere in stärker aufgelichteten Beständen und bei Baumarten mit geringerem Extinktionsvermögen (Kiefer, Birke) schlechte Ergebnisse.

Statt auf weniger gut geeignete Tage auszuweichen, empfiehlt sich der konzentrierte Einsatz von 2 Personen auf Messflächen, an denen die Messpunkte bereits vorher langfristig markiert sind; dies sichert hohe Effizienz bei den wenigen Stunden geeigneter Witterung. Die Witterungsentwicklung muss über Wettervorhersagen beobachtet werden. Größere Entfernungen zu Versuchsfeldern stellen ein besonderes Problem dar; ggf. kann ein Telefonat am geplanten Messtag mit örtlichen Partnern etwas mehr Sicherheit geben.

Tab. 1. Geräte und Bestimmungsgrößen für die Eignung zur Strahlungsmessung in Wäldern. Equipment and determinants of suitability for measuring forest light environments.

Gerät (Quelle)	Wellenlängen	Relative Strahlung; Messgenauigkeit	Viele Messungen	Diffus u. direkt	Zugang zu Messpunkten	Laufende Kosten	Investitionen
PUR/PAR-Sensoren (vgl. Dohrenbusch 1995)	400 bis 700 nm; aktionsidentisch mit Photosynthese	Bei Langzeit mit Data-Logger; bei momentan Referenzsensor und Uhrzeit; exakt	Bei Langzeit je ein Sensor; bei momentan gut	Bei Langzeit keine Trennung möglich; bei momentan nur für diffus	Mittlerer Aufwand für schwierige Situationen	Batterie, Wartung und Kalibrierung	Je nach System und Zahl der Sensoren (Data-Logger) sehr hoch
Luxmeter	450 bis 650 nm; wie menschliches Auge	Nur für momentan nötig; Referenzsensor u. Uhrzeit; exakt	Nur für momentan; gut	Nur für diffus	Mittlerer Aufwand für schwierige Situationen	Selten Kalibrierung	Gering
PCA LAI-2000 (vgl. Küßner 1999)	Wellenbereich < 490 nm	Nur für momentan nötig; Referenzsensor u. Uhrzeit inklusive; exakt	Nur für momentan; gut	Nur für diffus	Mittlerer Aufwand für schwierige Situationen	Batterie, Wartung	10.000 €
Hemisphärische Fotografie 12.000 € (vgl. Wagner 1994, 1998, 2001)	380 bis 700 nm; absorptionsidentisch mit Blättern	Nur für momentan	Nur für nötig; externe	Diffus u. direkt; momentan;	Mittlerer Aufwand Trennung über	Filmmaterial, für schwierige	6.000 – außer bei
		Messung in Bestandeslücken; gut über 10 %; darunter stark benutzerabhängig	gut	Modelle möglich	Situationen	Digitalkameras	
Horizontoskop (vgl. Thormann 1996)	menschliches Auge ist Maßstab	Generell: nicht gut; stark benutzerabhängig	Gut	Diffus u. direkt; Trennung über Modelle möglich	Unmöglich	Arbeitszeit, da Zeichnung nötig	

1.3.6 Schlussfolgerungen für die Strahlungsmessungen in Waldbeständen

Die Ausführungen und Schlussfolgerungen zu Strahlungsmessungen außerhalb von Waldbeständen (s. Abschnitt 1.2.7) sind zunächst hier auch zu berücksichtigen, weil Strahlungsmessungen in Wäldern ohne Bezug zu einer Referenzmessung außerhalb des Waldes nicht zu interpretieren sind (s. Abschnitt 1.3). Zusätzlich bewirkt die räumliche Anordnung vor allem der grünen Blätter (Nadeln) im Zusammenspiel mit der zeitlichen Variation der Strahlung oberhalb der Bestände eine sehr komplexe raum-zeitliche Strahlungsvariation in Wäldern. Besonders bei unregelmäßigen Bestandesstrukturen mit verschiedenen Höhengschichten und unterschiedlichen Bestandesdichten (Lücken), sind „repräsentative“ Situationen in Beständen nicht zu finden. Sollen Waldbestände durch Strahlungsmessungen charakterisiert werden, muss die räumliche und zeitliche Variation berücksichtigt werden.

Damit sind zwei wichtige Forderungen zu formulieren: 1) keine Strahlungsmessungen in Wäldern ohne Referenzmessungen außerhalb von Wäldern und 2) eine ausreichende, an die Strahlungsvariation angepasste Stichprobengröße der Strahlungsmessungen.

Zu 1): Die Durchführung der Referenzmessungen ist oft bereits ein großes messtechnisches Problem, weil über den Baumkronen nur in Ausnahmefällen gemessen werden kann (Messtürme) und weil echte Freiflächen ohne seitlichen Einfluss des Waldes in der Nähe von Versuchsflächen kaum zu finden sind. Außerdem ist wegen der zeitlichen Variation der Strahlung auch auf Freiflächen eine unmittelbare Nähe zu den Messstationen im Wald zu fordern (Dohrenbusch 1995), die meist nicht erfüllt werden kann. Grundsätzlich werden zwei Lösungen für das Referenzmessungsproblem gesehen, die aber nicht das Problem einer ggf. zu berücksichtigenden Horizonteneinengung am Referenzmesspunkt lösen:

- a) Dohrenbusch (1995) sieht in der langfristigen integrierenden Messung, die sowohl an den Messpunkten im Bestand wie auf der Freifläche durchgeführt wird, eine akzeptable Lösung.
- b) Eine zweite Lösung, zu repräsentativen Relativwerten zu gelangen, wird in synchronisierten Momentanmessungen bei homogen bewölktem Himmel gesehen (Dohrenbusch 1987, Messier u. Puttonen 1995). Auch Brunner (1994) stellt die Brauchbarkeit dieser Relativwerte fest.

Zu (2): Die in Betracht zu ziehende Strahlungsvariation ist von großer Bedeutung. Sollen für einzelne Punkte im Bestand – z. B. oberhalb einzelner Verjüngungspflanzen – Messwerte geliefert werden, liegt ausschließlich eine zeitliche Variation der Strahlungswerte vor. Soweit dieser Rechnung getragen wird, sind die Werte zu akzeptieren. Werden jedoch flächenhaft repräsentative Aussagen gewünscht, so ist die raum-zeitliche Variation in dieser Fläche zu berücksichtigen (van Eimern u. Erhardt 1985). Das kann zum einen den Messaufwand erheblich vergrößern. Da die Messungen nur punktuell vorgenommen werden und da die Strahlungsverhältnisse umso heterogener sind, je stärker die Bestandesauflichtung ist, muss demzufolge die Stichprobe größer sein. Absolute Stichprobengrößen können nicht generell angegeben werden. Zum anderen ist es fraglich, ob eine Mittelwertsangabe überhaupt die gewünschte Aussage liefert. So sind z. B. die extrem heterogenen Strahlungsverhältnisse auf Bestandeslücken (Mosandl 1984, Wagner 1994) kaum durch Mittelwertsangaben zu repräsentieren. Die Erfassung von Bestandeslücken (gaps) erfordert daher besonders differenzierte Messungen (vgl. z. B. Coates 2002, Gray et al. 2002)

1.4 Übersicht über Geräte und Einsatzgebiete

Alle für die Strahlungsmessung geeigneten Geräte messen primär Strahlungsenergie; das trifft auch für Geräte zu, die ihre Messwerte in Strahlungsstromdichten (PPFD) angeben. Diese Geräte sind durch Filter auf ganz spezielle Wellenlängen genormt (Dohrenbusch 1995), so dass von konstanten Umrechnungsfaktoren in deren Energie ausgegangen werden kann (vgl. Abschnitt 1.2.2). Man kann die Geräte nach verschiedenen Kriterien ordnen, so nach der Sensitivität für Wellenlängen, nach der Oberflächenform der Messfläche, nach den ausgegebenen Strahlungswerten, nach der zeitlichen Auflösung der Messungen, nach dem Messprinzip. Es gibt auch Kombinationen aus Messungen mit Strahlungsmodellen, und schließlich gibt es Apparaturen, die keine eigentliche Messung vornehmen, sondern durch menschliches Bewerten indirekt Strahlungsinformationen liefern.

Für die Durchführung der Strahlungsmessungen in Waldbeständen kommen verschiedene Kriterien in Betracht, deren Wichtung durch die konkrete Untersuchung vorgegeben ist (siehe Abschnitt 1.1). Die folgenden Forderungen (vgl. hierzu auch Newman 1985) können nicht alle gleichzeitig erfüllt werden; sie sind typisch für verschiedene Untersuchungsziele.

- Die Wellenlängen sollen dem Aktionsspektrum der Photosynthese entsprechen.
- Die Messungen sollen relative Strahlungswerte hoher Repräsentativität und Exaktheit liefern.
- Es soll an vielen Stellen in Beständen gemessen werden.
- Es soll nach diffuser und direkter Strahlungskomponente unterschieden werden.
- Die Messungen sollen an schwer zugänglichen Stellen durchgeführt werden.
- Die Kosten/der Zeitaufwand für die Messungen sollen gering sein.
- Die Investitionskosten sollen gering sein.

Leider gibt es zzt. keine Messmethode, die alle diese Anforderungen erfüllt. Daher ist eine Prioritätenfestlegung durch den Forscher unbedingt erforderlich. Die nachfolgende Tab. 1 gibt einen Überblick, welche Geräte zzt. für die an waldbaulichen Fragen orientierte Strahlungsmessung in Wäldern zur Verfügung stehen. Insgesamt muss beachtet werden, dass eine Vergleichbarkeit der mit den verschiedenen Methoden erzielten Messergebnisse nur eingeschränkt möglich ist. Hinweise zur Übertragbarkeit von PAR-Messungen und Strahlungsschätzungen aus Fish-eye-Bildern hat Wagner (1996) gegeben, den Zusammenhang zwischen Messungen der Photonenflussdichte und der Erfassung der relativen Beleuchtungsstärke haben Muraoka et al. (2001) untersucht. Weitere Studien, in denen Methodenvergleiche durchgeführt wurden, haben Salminen et al. (1983), Brunner (1993) und Hale (2003) vorgestellt.

Zusammenfassend kann aber festgehalten werden, dass die bei weitem am häufigsten verwendeten Methoden im Rahmen waldbaulicher Untersuchungen die Strahlungsmessung mit PAR-Sensoren (vgl. z. B. Mitchell 2001, Claveau et al. 2002, Nilsson et al. 2002) und die Strahlungsschätzung aus hemisphärischen Fotos (vgl. z. B. Coates. Burton 1999, Battles u. Fahey 2000, Wright et al. 2000, Collet et al. 2001, Sterck u. Bongers 2001) bzw. eine Kombination daraus (z. B. Kaelke et al. 2001) darstellen.

Neben den Verfahren zur Strahlungsmessung bzw. -schätzung in Wäldern, die auf den in Tabelle 1 vorgestellten Geräten aufbauen, wurde die Eignung weiterer Methoden getestet. So besteht die Möglichkeit, über die Verwendung von photosensitiven Papieren die Strahlungsintensität unter Waldbeständen abzuschätzen (vgl. Friend 1961, Bardon et al. 1995).

1.2.7 Schlussfolgerungen für die Strahlungsmessungen außerhalb (oberhalb) von Waldbeständen

Bedingt durch den wechselnden Zustand der Erdatmosphäre über dem Messpunkt (Wolken, Partikel) und den wechselnden Sonnenstand nach Azimut und Horizontwinkel, wird die auf die Erde auftreffende Strahlung in vielfältiger Weise beeinflusst. Dies führt zu zeitlich extremer Variation des Strahlungsflusses nach Wellenlängenbereichen (Qualität) und Intensität. Vergleichende ökologische Strahlungsmessungen – z. B. an verschiedenen Orten – sind demzufolge nur (a) als integrierende Langzeitmessungen oder (b) unter streng standardisierten Messbedingungen als Momentanmessungen möglich. Da vor allem die Messung der direkten Strahlung starken Schwankungen ausgesetzt ist, sind wirklich homogene Strahlungsverhältnisse nur unter einheitlich dichten Wolkendecken zu finden. Doch selbst unter solchen Bedingungen wechselt die absolute Strahlungsenergie im Tagesverlauf. Messsensoren sind dementsprechend nach ihrer spektralen Empfindlichkeit, den Eigenschaften ihrer Messoberfläche und der zeitlichen Auflösung der Messungen für verschiedene Messzwecke geeignet und zu ordnen (Abschnitt 1.4 Übersicht über Geräte und Einsatzgebiete).

1.3 Effekte von Wäldern auf Strahlung; Strahlungsmessungen in Wäldern

Sind schon die Messungen außerhalb von Wäldern starken zeitlichen Schwankungen ausgesetzt, so werden diese Schwankungen unter dem Einfluss von Bäumen und Beständen noch deutlich größer. Um diesen walddespezifischen Effekt herauszuarbeiten, bedarf es stets einer vergleichenden Messung außerhalb des Waldes (Referenzmessung; s. Abschnitt 1.3.6). Dadurch kommt man zu relativen Strahlungswerten, die den prozentualen Anteil der Freilandstrahlung an einem bestimmten Punkt im Bestand angeben.

Wodurch kommen diese Abwandlungen der Strahlung in Wäldern zustande? Zum Verständnis ist es hilfreich, davon auszugehen, dass das Blätterdach der Pflanzen als „Energiefalle“ (Knyazikhin et al. 1996) wirkt: Eine möglichst weitgehende Nutzung der photosynthetisch aktiven Strahlung (insbes. PPFd) ist für die Pflanzen vorteilhaft. In diese Richtung wirken verschiedene Mechanismen, die jetzt besprochen werden sollen. Auf die inhaltliche Verbindung der folgenden Ausführungen mit Abschnitt 2 sei hingewiesen. Für grundlegende Literatur siehe Ross (1981), Larcher (1994) und Neumann et al. (1989).

1.3.1 Optische Blatteigenschaften

Bezogen auf die interessierenden Wellenlängenbereiche (PAR und NIR), werden (bei Laubbäumen) im Jahresverlauf und baumartenspezifisch sehr unterschiedliche Anteile der Strahlung reflektiert, absorbiert oder unverändert transmittiert. Vor allem zwischen PAR und NIR finden unter dem Kronendach erhebliche Verschiebungen in den Anteilen der messbaren Strahlung statt und zwar derart, dass der Anteil des NIR gegenüber der PAR i. d. R. deutlich erhöht ist. Nadelbäume sind hier allerdings anders zu bewerten als Laubbäume: Wahrscheinlich ist die Verschiebung zugunsten der NIR unter dem Kronendach von Nadelbäumen weniger stark ausgeprägt (Liefers et al. 1999). Literaturangaben zur Veränderung bestimmter Wellenlängenbereiche unterhalb des Kronenraumes von Waldbeständen, insbesondere zur Veränderung des R/FR-Verhältnisses der Strahlung (siehe Abschnitt 1.2.1) finden sich bei Ammer (2000). Unter ausgereiften Buchenblättern liegt die Absorption der PAR-Wellenlängen bei etwa 90 %, d. h., es ist eine sehr hohe Effektivität einer Blattschicht als „Energie-

falle“ gegeben, während die NIR-Wellenlängen zu lediglich etwa 30 % absorbiert werden (z. B. Tanner u. Eller 1986). Durch die Reflexion (Streuung) der Strahlung an den Blättern kommt es in den Beständen zu einem systematisch erhöhten Anteil an diffuser Strahlung. Dieser wurde z. B. von Canham et al. (1994) als eigene Strahlungskomponente gesondert erfasst.

1.3.2 Blattflächen

Da die absorbierenden und reflektierenden Eigenschaften der farbstofftragenden Organe eng mit deren Oberflächen in Verbindung stehen, ergibt sich eine große Bedeutung dieser Größe für die Strahlung. Speziell die (einseitige) Blattfläche der Laubbäume ist ein wichtiger Weiser für die Fähigkeit der Bäume, die Strahlung in Beständen zu beeinflussen. Je mehr Blattfläche (in m²) je Bodenoberfläche in einem Bestand vorhanden ist, umso intensiver sollte diese Beeinflussung sein. Das ist die Größe des Blattflächenindex (leaf area index, LAI), dem in ökophysiologischen Untersuchungen stets eine große Bedeutung beigemessen wird (Vose et al. 1995). Hinsichtlich der Blattflächenindizes unterscheiden sich Baumarten (Hagemeyer 1997), Altersstadien (Brown u. Parker 1994) und Standorte (Ellenberg 1996, S. 97). Da – von der Erde aus betrachtet – die Sonne eine Flächenausdehnung von etwa 0,5 Grad aufweist, kommt es durch die Blätter eines Bestandes nicht nur zu totaler Abdeckung der Sonne, sondern auch zu nur teilweiser – je nach Baumart und Abstand zum Messpunkt. Dadurch wird die am Messpunkt ankommende Strahlungsenergie proportional zur abgedeckten Teilfläche der Sonnenscheibe verringert. Diese Teilabschirmung wird „Penumbra“ genannt. Besonders in sogenannten Sonnenflecken ist der Anteil an Penumbra relativ hoch.

1.3.3 Blattneigungswinkel

Bereits aus den Ausführungen in Abschnitt 1.2.6 geht hervor, dass auch die Anordnung der Blätter in Bezug auf den Einfallswinkel der Strahlung einen wichtigen Aspekt bei der Strahlungsbeeinflussung darstellt. Da die Blätter nicht alle einheitlich ausgerichtet sind, ist die Erfassung der Blattneigungswinkelverteilung in Beständen von Interesse. Hier unterscheiden sich die Baumarten (Schlünder 1991). Bei gleicher Blattfläche erweisen sich Baumarten mit überwiegend horizontalen Blattneigungswinkeln (planophil, z. B. Buche) gegenüber solchen mit mehr vertikaler Blattneigungswinkelhäufigkeit (erektophil, z. B. Birke) als effektiver bei der Strahlungsabsorption (Oker-Blom u. Kellomäki 1982).

1.3.4 Blattklumpungen

Gleiche Blattflächenindizes und Blattneigungswinkelverteilungen verschiedener Baumarten sind erst in Kombination mit der Anordnung der Blätter zur Vermeidung der gegenseitigen Beschattung innerhalb der Baumkronen ausschlaggebend. Baumarten mit stärkerer Klumpung der Blattfläche weisen eine größere Selbstbeschattung auf als solche mit geringerer Klumpung (für Buche u. Eiche siehe Hagemeyer 2002; für Kiefer siehe Oker-Blom u. Kellomäki 1983) und sind daher wenig effektiv.

1.3.5 Holz

Über die optischen Eigenschaften und die Bedeutung der hölzernen Baumteile liegen kaum Informationen vor. Grundsätzlich ist aber auch dieser Bestandteil als absorbierend und reflektierend von Bedeutung. Baumarten mit heller Rinde (Birke) weisen erhöhte Streuungswerte auf.

nis der Photonenflussdichte zwischen 655 und 665 nm (**R**) und der Photonenflussdichte zwischen 725 und 735 nm (**FR**) beeinflusst (Smith 1994). Neben der PAR wird daher häufig auch das dimensionslose so genannte R/FR-Verhältnis der Strahlung erfasst (Turnbull 1991, Muraoka et al. 2001).

1.2.2 Einheiten der Messungen der PAR

Von Interesse sind die Einheiten, in denen die photosynthetisch aktive Strahlung gemessen wird: Es ist möglich, die Strahlungsenergie pro Flächeneinheit (gewöhnlich horizontal orientiert) anzugeben (photosynthetische Strahlung: Watt x m⁻²) oder auch die Zahl der Photonen pro Flächeneinheit und Zeiteinheit (photosynthetische Photonenflussdichte: μ Einstein x m⁻² x sec.). Obwohl ein Photon des 700 nm Wellenlängenbandes nur etwa 57 % der Energie eines Photons des 400 nm Bandes trägt, lässt sich in der Regel eine sehr ähnliche Photosyntheseaktivität über das gesamte Wellenlängenspektrum der PAR feststellen (Pearcy et al. 1989, Dohrenbusch 1995). Deshalb wird angenommen, dass die Zahl der Photonen für die Photosynthese wichtiger ist als die Energieunterschiede der Photonen; somit wird für Wachstumsprozesse üblicherweise die photosynthetische Photonenflussdichte angegeben. Eine detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge findet sich bei Tevini und Häder (1985) und von Willert et al. (1995). Mit einer akzeptablen Genauigkeit für den Wellenlängenbereich der PAR lässt sich die photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD) in die photosynthetische Strahlung (PS) umrechnen; dazu wird folgende Formel verwendet: $W \times m^{-2} = 0,223 \times \mu \times m^{-2} \times sec^{-1}$ (siehe auch Larcher 1994, S. 11). Die gelegentlich verwendete photosynthetisch nutzbare Strahlung (PUR = photosynthetic usable radiation) berücksichtigt den Umstand, dass innerhalb des photosynthetisch aktiven Spektralbereichs zwischen 400 bis 700 nm zwar alle Photonen zur Gewinnung von Assimilationsenergie brauchbar sind, von der Pflanze aber in unterschiedlicher Intensität genutzt werden. Vor allem Photonen des roten und blauen Lichtes sind photosynthetisch stark wirksam, während der grüne Spektralbereich um 550 nm wenig wirksam ist. Die grüne Blattfärbung ist die Folge hoher Reflexions- und Transmissionsanteile eben dieses für die physiologischen Prozesse relativ unbrauchbaren Spektralausschnitts. Somit ahmt ein PUR-Sensor das photosynthetische Wirkungsspektrum grüner Pflanzen nach: zwei Maxima bei 450 nm (blau) und 650 nm (rot) sowie ein Minimum bei 550 nm (grün). Für ein solches Spektrum lässt sich keine Photonenstromdichte, sondern nur eine Energieeinheit (Watt x m⁻² oder Joule x m⁻²) angeben.

1.2.3 Direkte und diffuse Strahlungskomponenten

Es werden – bezogen auf die Strahlungsquelle Sonne – zwei Strahlungskomponenten getrennt, die sich vor allem hinsichtlich der Wellenlängen und somit der Energie erheblich unterscheiden: Die direkt von der Sonne ausgehende Strahlung, die ohne weitere Streuung in der Erdatmosphäre oder an fester Materie den Messsensor trifft und die – ggf. mehrfach – gestreute Strahlung, die als diffus bezeichnet wird. Hier ist vor allem an Streuung in der Atmosphäre gedacht. Zur diffusen Strahlung rechnet die von der Fläche des Himmels (bewölkt wie unbewölkt) ausgehende Strahlung, zur direkten Strahlung rechnet die von der Sonnenscheibe und – nicht ganz exakt – auch die von der die Sonne umgebenden Aura ausgehende Strahlung. Intensität und Qualität (Wellenlängen) der beiden Strahlungskomponenten unterliegen erheblichen Variationen, die durch den Winkel der Sonne über dem Horizont (siehe Abschnitt 1.2.5 Sonnenstand) und das aktuelle Witterungsgesche-

hen (siehe Abschnitt 1.2.4 Witterungseinflüsse (Wolken)) bestimmt sind. Bei einem Sonnenwinkel von 60 Grad über Horizont (Juni, 50. Breitengrad) und wolkenlosem Himmel liefert die direkte PAR auf eine horizontale Messfläche etwa 200 W x m⁻², die diffuse PAR Himmelsstrahlung dagegen lediglich etwa 5 W x m⁻².

1.2.4 Witterungseinflüsse (Wolken)

Witterungseinflüsse sind neben unterschiedlichen Sonnenhöhenwinkeln (s. Abschnitt 1.2.5) die wichtigste Ursache für kurzfristig sehr stark schwankende Einstrahlungen, weil der Beitrag der direkten Sonnenstrahlung dadurch bestimmt wird. Solche Schwankungen sind besonders an Tagen mit Kumulusbewölkung (weiße „Schönwetterwolken“) extrem ausgeprägt, an denen innerhalb weniger Minuten die Strahlungswerte stark wechseln. Diese Witterungseinflüsse machen sich auch bei Wochen- oder Monatsmittelwerten bemerkbar und sind schließlich auch regional bedeutsam. Das Klima verschiedener Regionen unterscheidet sich oft signifikant im Anteil von „Sonnenscheinstunden“. So überwiegt in atlantisch getönten Klimaten mit einem hohen Anteil von Bewölkungsstunden (65-75 % in den Hochlagen der Mittelgebirge und den Küstenregionen) der Anteil der diffus eingestrahelten Energie, in subkontinental getönten Klimaten mit einem höheren Anteil der Sonnenscheindauer (35-45 %) sind die Beiträge von direkt und diffus eingestrahelter Energie etwa ausgeglichen. Hierbei gibt es natürlich auch jahreszeitlich bedingt Unterschiede (Dohrenbusch 1995).

1.2.5 Sonnenstand über Horizont

Da die Streuung an Partikeln der Erdatmosphäre wesentlich zur Reduktion der Strahlungsenergie beiträgt (s. Abschnitt 1.2.3), ist die Streckenlänge, die ein Photon durch die Atmosphäre zurückzulegen hat, bevor es auf den Messsensor trifft, ein wesentlicher Faktor für den gemessenen Strahlungswert. Bei niedrigen Sonnenhöhenwinkeln ist diese Strecke erheblich länger (Kosinusfaktor). Bei geringen Horizontwinkeln überwiegt der Anteil langwelliger, energieärmerer Strahlung. Dieser Effekt führt zu Schwankungen des Energieflusses im Tages-, aber auch im Jahresrhythmus besonders der direkten Strahlung. Bei 32 Grad über Horizont (8:00, Mitte Juni) und wolkenlosem Himmel liefert die direkte PAR auf eine horizontale Messfläche etwa 100 W x m⁻², bei 60 Grad (11:30) etwa 200 W x m⁻².

1.2.6 Neigung der Empfangsfläche; Geländeeffekte

Aus dem Begriff der Photonenflussdichte (s. Abschnitt 1.2.2) geht hervor, dass auch die Neigung der der auftreffenden Strahlung ausgesetzten Fläche die Strahlungsmesswerte beeinflusst: Eine gleich große Photonenflussdichte trifft auf einer – bezogen auf den Einfallswinkel der Strahlung – von 90 Grad abweichend geneigten Fläche auf eine größere Fläche; somit ist auf derart geneigten Flächen die Strahlungsdichte geringer als auf horizontal zum Einfallswinkel exponierten Flächen (Schubert 1991). Bezogen auf die Anordnung von planaren Messelemente bedeutet dies, dass – bedingt durch den Tagesgang der Sonne – sowohl Azimut- als auch Horizontwinkelausrichtungen einen Einfluss auf die Messwerte haben. Eine nach Süden exponierte, mit 30° Neigung ausgerichtete Fläche erhält bei einem Horizontwinkel der Sonne von 60 Grad und einem Azimutwinkel von Süd (180°) etwa 25 % mehr Strahlungsenergie als eine horizontal liegende Fläche zur gleichen Zeit. Weitere Details finden sich z. B. bei Häckel (1990).

		Seite
1	Strahlung	
1.1	Einführung	111
1.2	Grundlagen: Strahlungsmessungen ohne Einfluss des Waldes	111
	1.2.1 Wellenlängen	111
	1.2.2 Einheiten der Messungen der PAR	112
	1.2.3 Direkte und diffuse Strahlungskomponenten	112
	1.2.4 Witterungseinflüsse (Wolken)	112
	1.2.5 Sonnenstand über Horizont	112
	1.2.6 Neigung der Empfangsfläche; Geländeeffekte	113
	1.2.7 Schlussfolgerungen für die Strahlungsmessungen außerhalb (oberhalb) von Waldbeständen	113
1.3	Effekte von Wäldern auf Strahlung; Strahlungsmessungen in Wäldern	113
	1.3.1 Optische Blatteigenschaften	113
	1.3.2 Blattflächen	113
	1.3.3 Blattneigungswinkel	113
	1.3.4 Blattklumpungen	113
	1.3.5 Holz	113
	1.3.6 Schlussfolgerungen für die Strahlungsmessungen in Waldbeständen	114
1.4	Übersicht über Geräte und Einsatzgebiete	114
1.5	Hinweise zur Durchführung von Strahlungsmessungen	115
	1.5.1 Momentanmessungen	115
	1.5.2 Permanentmessungen	116
1.6	Hinweise auf Strahlungsmodelle	116
2	Kronenraumstruktur	116
2.1	Einführung	116
2.2	Methoden	117
	2.2.1 Direkte Methoden	117
	Einzelbaumuntersuchungen	117
	Bestandesbezogene Untersuchungen	117
	2.2.2 Indirekte Methoden	118
	Einzelbaumuntersuchungen	118
	Bestandesbezogene Untersuchungen	118
	Literatur	119

1 Strahlung

1.1 Einführung

Bevor Strahlung über und in Waldbeständen gemessen wird, sollte einige Zeit auf die Frage verwendet werden, was diese Strahlungsmessungen aussagen sollen. Diese zunächst banale Aufforderung ist dadurch begründet, dass es sehr unterschiedlich genaue und auch unterschiedlich arbeits- und kostenintensive Methoden der Strahlungsmessung gibt, die – angemessen eingesetzt – fast alle ihr jeweiliges Anwendungsfeld besitzen. Ein „Richtig“ oder „Falsch“ ergibt sich also zuerst aus der Eignung einer Methode für die jeweilige Fragestellung. Weiterhin gibt es allerdings auch Fehler bei der Anwendung einzelner Methoden, die im Falle der Strahlungsmessungen sehr groß sein können. Die Durchführung von Strahlungsmessungen bedarf daher gründlicher Vorüberlegungen, der Planung und einer erheblichen Sorgfalt.

Gängige Themen, für deren Bearbeitung Strahlungsmessungen notwendig sind, sind z. B. die Beeinflussung der Qualität und Intensität einfallender Strahlung durch Waldbestände („Effekt“ auf Strahlung) oder die Beeinflussung biotischer und abiotischer Prozesse in Wäldern durch die Strahlung („Antwort“ auf Strahlung). Unter „Effekten“ ist z. B. die Veränderung der Strahlung einzuordnen, die auf der spezifischen Durchlässigkeit von Kronendächern verschiedener Baumarten für bestimmte Wellenlängen beruht; ein Beispiel für die „Antwort“ auf Strahlung ist die Wachstumsreaktion von Verjüngungspflanzen auf die Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung oder auch die Habitatwahl von Maus- und Insektenpopulationen in Abhängigkeit von der Intensität direkter Strahlung am Waldboden.

Jedes der genannten Beispiele sollte mit einer anderen Methode der Strahlungsmessung bearbeitet werden, auch wenn alle diese Messungen unter den Oberbegriff „ökologische Strahlungsmessungen“ fallen.

Die folgenden Ausführungen sollen helfen, die richtige Wahl zu treffen. Ein Grundverständnis von Strahlungsphysik ist leider unerlässlich und sollte durch die Lektüre von einschlägigen Werken abgesichert werden (z. B. Pearcy et al. 1989, Baldocchi u. Collineau 1994, Landsberg u. Gower 1997).

1.2 Grundlagen: Strahlungsmessungen ohne Einfluss des Waldes

1.2.1 Wellenlängen

Die auf die Atmosphäre der Erde einfallende Strahlung (Globalstrahlung) deckt einen Wellenlängenbereich von Ultraviolett (ab 280 nm) bis Infrarot (bis über 2500 nm) ab, der durch die Eigenschaften der Erdatmosphäre – im Wesentlichen durch Filterwirkung – bereits verändert wird. Für Pflanzenbestände sind vor allem der Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (photosynthetically active radiation, **PAR**, Wellenlängenbereich definiert von 400 bis 700 nm) und das Nahe Infrarot (near infrared radiation, **NIR**, 700 nm bis 800 nm) von Interesse. Für die Fauna werden dagegen eher ein spektraler Ausschnitt der UV-Strahlung (Bienen) oder der langwellige Bereich über 800 nm relevant sein. Zur Messung dieser Strahlung sind oft Temperaturmessungen, die hier nicht behandelt werden, besser geeignet (für einen Vergleich von Globalstrahlungs- und Temperaturmessungen in Buchenwäldern siehe z. B. van Eimern u. Erhardt 1985). Bestimmte morphologische Pflanzenreaktionen werden insbesondere bei schattenintoleranten Arten unabhängig von der PAR vom Verhält-