

# **Einfluß räumlicher Bestandesstrukturen auf die Strahlungsverhältnisse in Fichten-Buchen Mischbeständen**

**Markus Meschederu**

**Lehrstuhl für Waldwachstumskunde  
Forstwissenschaftliche Fakultät  
Ludwig-Maximilians Universität  
München**

## **Einleitung**

Strahlungsmodelle gewinnen eine zunehmende Bedeutung in der Modellierung von Waldwachstum. Der Faktor Licht, der in entscheidendem Maße die Photosynthese und somit die Produktion beeinflusst, ist eine wichtige Steuergröße in diesen Wachstumsmodellen.

Die vorhandene Strahlung gibt z. B. über folgende Punkte Auskunft:

- Potentielles Wachstum einer Verjüngungsschicht
- Durchforstungsstrategien zur Optimierung des Lichtgenusses (KNYAZIKHIN 1994)
- Verbesserung der Produktion des Bestandes
- Weiserwert für ökologische Faktoren (BRUNNER 1994).

Mit entsprechenden Modellen kann man Strahlungswerte an beliebigen Punkten im Bestand schätzen und erspart sich aufwendige Messungen. Ein wichtiger Punkt ist die Integration der Strahlung in Wachstumsmodelle. Damit können Maßzahlen, die auf rein dendrometrischen Größen beruhen, mit der ökophysiologischen Größe Strahlung in Zusammenhang gebracht werden.

Die Ansätze für die Strahlungsmodellierung variieren je nach Fragestellung stark. Besitzt man nur Daten auf Bestandesebene, wie z.B. Stammzahl-Durchmesser-Verteilungen und Bestandeshöhenkurven, muß man sich mit einem eindimensionalen Modell begnügen, das die vertikale Helligkeitsverteilung vom Boden bis oberhalb des Bestandes beschreibt. Der gesamte Kronenraum wird als homogene Einheit betrachtet. Verfügt man zusätzlich über einzelbaumbezogene Daten, die es gestatten, Form und Lage der Baumkronen zu bestimmen, so ist es

möglich, ein dreidimensionales Modell zur Beschreibung des Strahlungshaushaltes zu konstruieren. Damit kann man relative Beleuchtungsstärken im Verhältnis zur Freilandstrahlung bei bedecktem Himmel für beliebige Punkte im Bestand berechnen.

## **Methodik**

Zur Parametrisierung und Validierung eines Strahlungsmodells müssen Messungen in einem realen Bestand unter definierten Randbedingungen durchgeführt werden, zu denen als wichtigste das Wetter gehört. Hier ist ein gleichmäßig bewölkter Himmel erforderlich, um Lichtflecken auf dem Waldboden zu vermeiden, die das Modell verfälschen würden. Die Gesamthelligkeit des Himmels darf sich während der Messungen nicht zu stark ändern. Um der Forderung nach möglichst vielen aussagekräftigen Messungen bei noch vertretbarem Aufwand nachzukommen, werden horizontale Messungen am Bestandesboden auf einem 5 x 5 Meter Raster und vertikale Messungen in 1 Meter Stufen an wenigen Punkten im Bestand durchgeführt.

Auf der Basis des von BARTELINK (1995) geschriebenen Programmes Mapflux wurde ein einzelbaumabhängiges Bestandesstrahlungsmodell erstellt. Das Programm Mapflux wurde zur Untersuchung des Strahlungsklimas in ungleichaltrigen Mischbeständen konzipiert und simuliert den Strahlungsdurchgang eines Lichtstrahls durch einen Waldbestand, dessen Bäume durch geometrische Formen repräsentiert werden.

Dieses Strahlungsmodell wurde erweitert und abgeändert, um der besonderen Situation im Bestand Rechnung zu tragen. Da Einzelbaumdaten zur Konstruktion des Bestandes nur für die Versuchsfläche bekannt sind, muß man die Fläche am Bestandesrand geeignet fortsetzen. Das ist durch Spiegeln oder Verschieben der Fläche möglich, dabei steigt allerdings der Rechenaufwand gewaltig, da sich die Baumzahl vervielfacht. Aus diesem Grunde wurde hier aus den Bestandesdaten ein gemittelter, homogener Kronenraum gebildet und dieser neue „Einheitswald“ um die Fläche gelegt.

## Ablauf

Zu Beginn steht die Datenerhebung auf den Rasterpunkten im Bestand (siehe Abb. 1). Die dabei erhaltenen Daten werden in einem weiteren Arbeitsschritt aufbereitet und können zur Parametrisierung des Bestandesstrahlungsmodells verwendet werden. In dieses gehen geometrische Bestandesdaten (Koordinaten, Höhe, Kronenansatz und Kronenradius der Bäume), baumartenspezifische Strahlungsparameter (Zahl und Ausrichtung der Blätter in den Baumkronen), sowie die Strahlungsverteilung für das Freiland oberhalb des Kronendaches ein. Die Strahlungsparameter sollen durch wiederholte Programmläufe simulativ erschlossen und schrittweise optimiert werden. Das konzipierte Strahlungsmodell verwendet dieselben Eingangsdaten wie das Wachstumsmodell SILVA (PRETZSCH 1992, 1995) und kann in dieses integriert werden.

## Messungen

Zur Parametrisierung wurde auf den sechs Parzellen der Fichten-Buchen-Wuchsreihe Freising 813 jeweils ein Meßraster angelegt (siehe Abb. 5). Auf diesen Rasterpunkten wurden Messungen der photosynthetisch aktiven Strahlung<sup>1</sup> (PAR) an Tagen mit bedecktem Himmel durchgeführt.

Bei der Messung auf den Rasterpunkten im Bestand ist es wichtig, eine Referenzmessung an einem ortsfesten Punkt gleichzeitig durchzuführen, um die Einzelmessungen eichen zu können.

---

<sup>1</sup>Dieses Strahlungsband erstreckt sich über den Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. Meß- und Referenzsensor sind Quantensensoren vom Typ LI190SA der Firma LI-COR (LICOR 1991). Die Sensoren messen die photosynthetische Photonenflußdichte. Diese Größe beschreibt die Anzahl der Photonen, die im Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm pro Zeiteinheit auf eine Einheitsfläche fallen. Verwendete Einheiten sind Mole, Einstein, Photonen und Quanten. Dabei bestehen folgende Beziehungen:  $1 \mu \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 1 \mu \text{ E s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 6.022 \cdot 10^{17} \text{ Photonen s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 6.022 \cdot 10^{17} \text{ Quanten s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Für die Positionierung des Referenzsensors gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Aufstellung im Freiland
- Positionierung in einer Bestandeslücke
- Anbringung des Sensors oberhalb des Bestandes

Bei zunehmenden horizontalem Abstand von Referenz- und Meßpunkt kommen Unterschiede in der Beleuchtungsstärke (z.B. durch unterschiedliche Bewölkung) zum Tragen, vom Problem der gleichzeitigen Messung und der dadurch erforderlichen Datenübertragung über große Strecken ganz abgesehen. In geschlossenen Beständen sind genügend große Lücken, die quasi als Freiland zu bewerten sind, relativ selten zu finden.

Im vorliegenden Fall befindet sich der Referenzsensor, der die Freilandstrahlung mißt, oberhalb des Kronendaches. Der Meßsensor ist in einer Höhe von 1.40 m auf einem Stativ zusammen mit dem Datenlogger angebracht, der die Meßwerte speichert (siehe Abb. 2). Die Meßeinrichtung ist somit mobil und kann einfach über dem jeweiligen Rasterpunkt, der durch einen Holzpflock im Boden markiert ist, plaziert werden. Die Messungen wurden bei bewölktem Himmel durchgeführt, um Effekte wie Sonnenflecken auszuschließen. Man erhält mit diesen Messungen die horizontale Strahlungsverteilung im unteren Bestandesraum als absolute PAR-Werte in  $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$  und als relative Werte im Verhältnis zur Freilandstrahlung, gemessen mit dem Referenzsensor, im Bereich von 0% bis 100%. Auf den 6 Parzellen der Wuchsreihe befinden sich ca. 1000 solcher Meßpunkte.

Die Installationen für die vertikalen Lichtmessungen wurden unter Mithilfe eines Baumsteigers durchgeführt. Dieser verspannte im Kronenraum Tragseile, an denen im Abstand von 8 Metern Ringe eingeknüpft sind. An diesen Ringen kann man den Meßsensor vom Bestandesboden bis in den Kronenraum hochziehen (siehe Abb. 3). Der Referenzsensor wird auf diese Weise ebenfalls oberhalb des Kronendaches angebracht.

### **Bestandesstrahlungsmodell**

Der Kernalgorithmus des Strahlungsmodells besteht aus der räumlichen Beschreibung von Lichtstrahlen, die durch das Kronendach auf den Waldboden fallen. Ob sich nun Baumkronen und Lichtstrahlen schneiden, hängt dabei von der

Position des Gitterpunktes, für den die Bestrahlungsstärke ermittelt werden soll, der Orientierung des Strahls, sowie der Größe und Lage der Baumkronen ab. Die Bäume werden durch Stammfußpunkt in 3 Koordinaten, Baumhöhe sowie Kronenform beschrieben.

Für die Beschreibung diffuser Lichtbedingungen wird ein sogenannter Uniform Overcast Sky (UOC) angenommen. Der Himmel hat hier überall die gleiche Helligkeit, also eine isotrop nach unten gerichtete, diffuse Strahlung. Diese wird durch 9 Inklinations- und 36 Azimuthrichtungen implementiert. Damit erhält man 324 Teststrahlen pro Meßpunkt, die auf Schnittpunkte mit allen Bäumen untersucht werden.

Tritt ein Lichtstrahl in das Kronendach ein, durchschneidet er einen oder mehrere Baumkronen. Der Stamm, die Äste und Zweige werden nicht berücksichtigt, d.h. nur die Krone absorbiert Strahlung. Die Extinktion innerhalb des Kronendaches hängt stark von der Blattverteilung und der Ausrichtung der Blätter innerhalb der Kronen ab, sowie der räumlichen Verteilung der Kronen selbst. Die Baumkronen werden für Nadelbäume durch Kegel und für Laubbäume durch Rotationsellipsoide beschrieben.

Es werden folgende Annahmen zur Berechnung der Extinktion getroffen:

a) Die Blätter sind gleichmäßig, entsprechend einer Poissonverteilung pro Volumeneinheit, in der Baumkrone angeordnet. b) Transmission und Reflektion an den Blättern werden nicht berücksichtigt, für den Teststrahl ist die Krone homogen grau.

Die Extinktionsrate hängt dann von der Blattwinkelverteilung, der Blattflächendichte (in Quadratmetern pro Kubikmeter Kronenvolumen), der Richtung des Lichtstrahls und dem zurückgelegten Weg in der Baumkrone ab. Die Abschwächung der Strahlung wird mit dem Beer-Lambertschen Gesetz beschrieben. Es besagt, daß in jeder Schicht eines Materials der gleiche Bruchteil der eindringenden Strahlung verschluckt wird. Sei  $I_0$  die Strahlung, die an der Stelle  $l = 0$  in das Material eindringt, so läßt sich das Gesetz folgendermaßen schreiben:  $I(l) = I_0 * \exp(-\alpha * l)$ . In den Absorptionsfaktor  $\alpha$  gehen die vorangenannten Größen Blattflächendichte und Blattwinkelverteilung ein.

## Ergebnisse des Modells

In einem ersten Simulationslauf wurden mit diesem Modell relative Bestrahlungsstärken auf den Rasterpunkten der Versuchsfläche Freising 813 berechnet. Diese sollen zur Überprüfung des Modells mit der im Bestand gemessenen PAR-Strahlung und mit den mit SILVA berechneten Konkurrenzindices verglichen werden. Für die Strahlungsparameter wurden geschätzte Werte eingesetzt.

Die gemessenen Werte der PAR-Strahlung sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Quadrate entsprechen den Meßpunkten auf der Fläche. Der helle Fleck bei den Koordinaten 13 / 5 kommt von einer Buche, die umgestürzt ist und ein Loch in das Kronendach gerissen hat.

Zum Vergleich der Konkurrenzindices des Wachstumsmodells SILVA mit den Daten des Strahlungsmodells wurden die räumlichen Wuchskonstellationen bestimmt, die sich für jeden Meßpunkt ergeben<sup>2</sup>. Der Konkurrenzindex ist eine Zahl, die ein Maß für den Konkurrenzdruck auf den betrachteten kleinen Baum auf dem Rasterpunkt darstellt. Er kann nicht direkt mit der relativen Bestrahlungsstärke verglichen werden. In Abbildung 8 ist aus diesem Grunde die Grauwertcodierung invertiert, so daß hohe Konkurrenzindices dunklen Grauwerten entsprechen.

Strahlungsmodell und gemessene PAR-Werte zeigen ein ähnliches Verteilungsmuster, die beiden Buchengruppen, in denen die Strahlungswerte geringer sind, werden abgebildet.

Die modellierte relative Bestrahlungsstärke und der Konkurrenzindex aus SILVA zeigen aufgrund der gewählten Skalierung ebenfalls vergleichbares Verhalten, allerdings besitzen die Werte im Modell nicht die Bandbreite der realen Messungen, dazu müssen die Strahlungsparameter optimiert werden. Eine wichtige Rolle spielt zudem die Verteilung der Strahlung oberhalb des Bestandes. Das zur Zeit verwendete UOC-Modell ist noch nicht zufriedenstellend. Eine mögliche Alternative ist das Standard Overcast Sky Modell (MOON & SPENCER 1942, zit. in ANDERSON 1964), das im Zenith über dreimal höhere Helligkeit als am Horizont verfügt.

---

<sup>2</sup>Dazu wurde in der Mitte eines jeden Rasterquadrates ein kleiner Baum positioniert. Die Berechnung des Konkurrenzindex erfolgte mit dem in dem Wachstumsmodell SILVA vorgesehenen Verfahren.

## **Resumée**

Die mit einem Strahlungsmodell geschätzte relative Bestrahlungsstärke erspart aufwendige Messungen im Bestand, und man kann Daten an Punkten abgreifen, die im Bestand nur mit großem technischen Aufwand gemessen werden können. Darüberhinaus ist es im Modell möglich, die Bestandesstruktur beliebig zu verändern und man kann die direkten Auswirkungen auf das Strahlungsangebot untersuchen.

Einschränkend ist anzumerken, daß die Wellenlängenabhängigkeit des Strahlungstransportes nicht berücksichtigt wird, die Blätter absorbieren selektiv aus dem PAR-Band. Die PAR-Messungen im Bestand berücksichtigen die Wellenlänge aufgrund der Ausführung des Sensors ebenfalls nicht. Der Strahlungstransport selbst ist stark vereinfacht, es werden Annahmen getroffen, die auf einen Bestand direkt sicherlich nicht zutreffen, wie verallgemeinerte radial-symmetrische Kronenformen, gleichverteilte Blätter in der Krone und die Vernachlässigung von Ästen und Stämmen.

## **Zusammenfassung**

Auf der Fichten-Buchen Wuchsreihe Freising 813 wurden empirische PAR-Strahlungsmessungen durchgeführt. Die aufbereiteten Messdaten können zur Parametrisierung und Validierung eines dreidimensionalen Bestandesstrahlungsmodells verwendet werden.

Dieses berechnet für beliebige Gitterpunkte innerhalb eines Bestandes relative Bestrahlungsstärken. Die Baumkronen werden durch Kegel und Rotationsellipsoide beschrieben, Stämme und Äste werden nicht berücksichtigt. Für jeden Gitterpunkt werden Teststrahlen einzeln auf Schnittpunkte mit jeder Baumkrone geprüft. Ergeben sich Schnittpunkte mit einer Krone, so wird die Weglänge in der Krone berechnet und entsprechend der Blattflächendichte und der Blattwinkelverteilung gewichtet. Diese Werte werden aufsummiert und gehen in die Beer-Lambertsche Extinktionsformel ein, und man erhält den relativen Strahlungsanteil im Verhältnis zum Freiland. Damit ist es möglich, im Bestand beliebige horizontale und vertikale Helligkeitsverteilungen aufzustellen, mit deren Hilfe verschiedene Fragestellungen, wie z. B. das potentielle Wachstum einer Verjüngungsschicht oder die Verbesserung der Standraumsituation förderungswürdiger Bäume durch den Aushieb von Konkurrenten bearbeitet werden können.

## Abbildungen

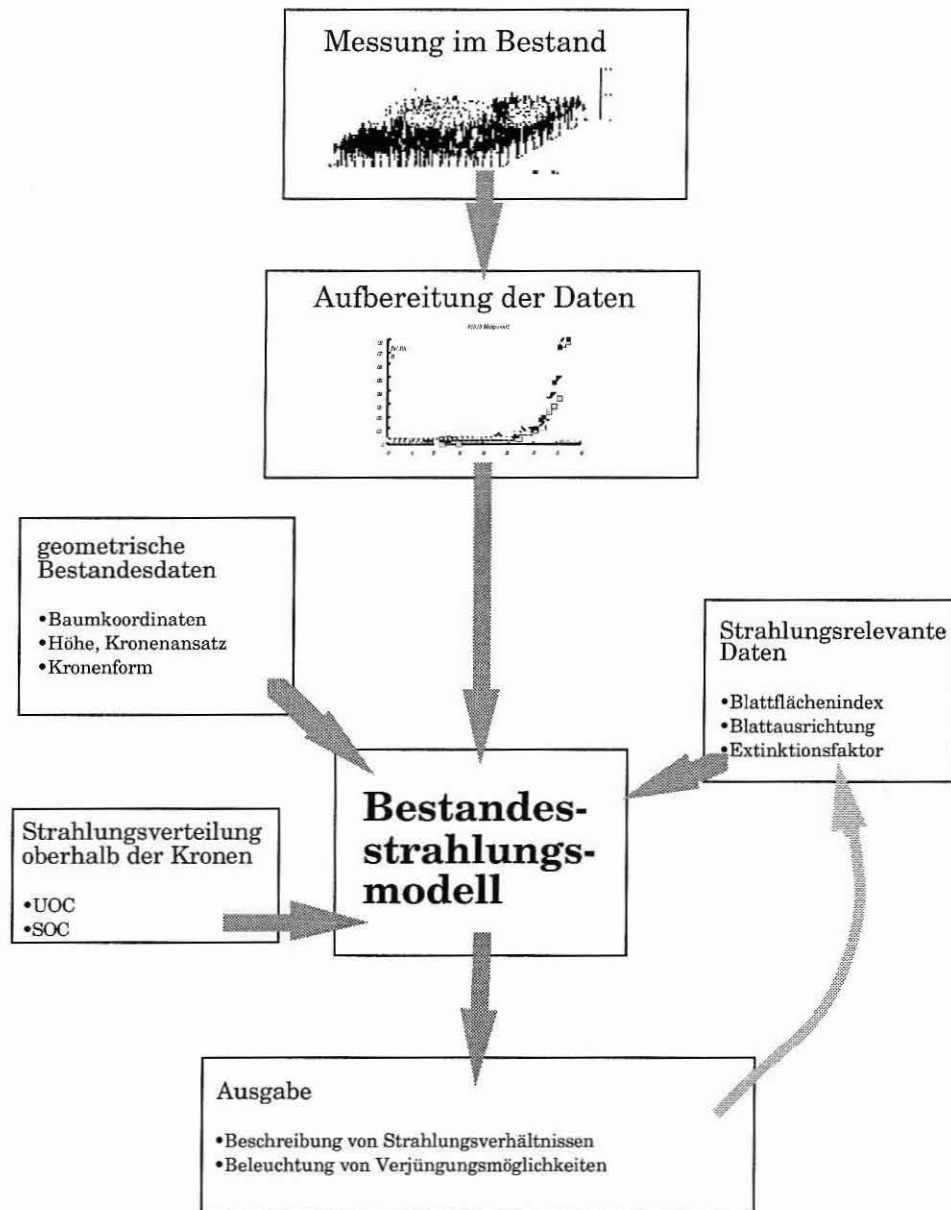


Abbildung 1: Ablaufdiagramm des Datenflusses.



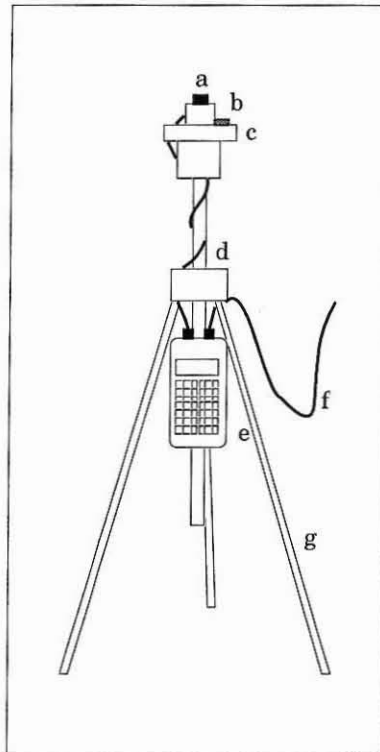


Abbildung 2: Meßsensor mit Datenlogger auf Stativ. a) Sensor b) Libelle c) Halterung d) Kabel zum e) Datenlogger f) Kabel zum Referenzsensor g) Stativ

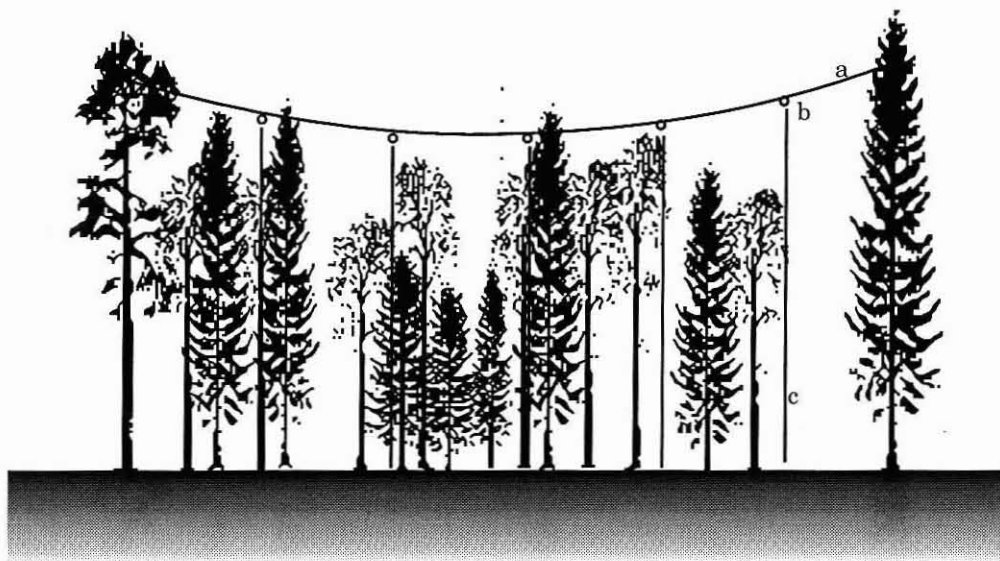


Abbildung 3: Messung des vertikalen Lichtprofils. a) Trageil b) Stahlring c) Seil, an dem der Meßsensor hochgezogen werden kann.

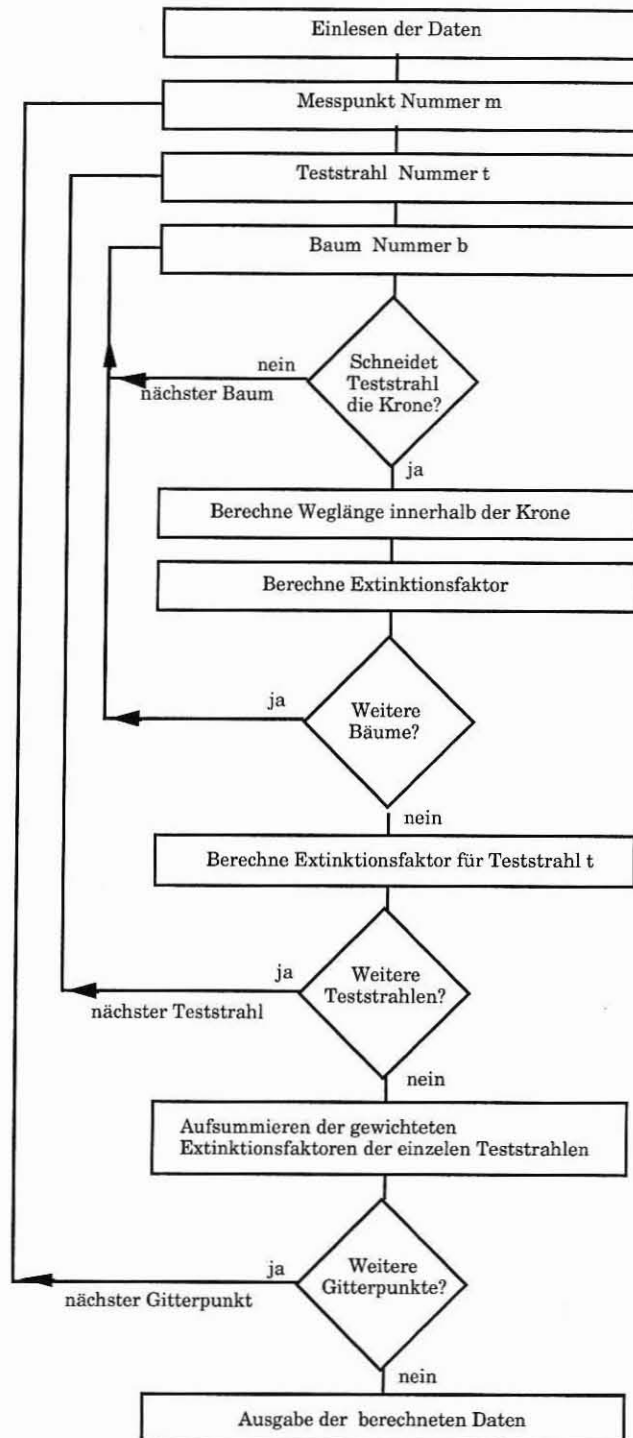


Abbildung 4: Ablaufplan des Bestandesstrahlungsmodells.

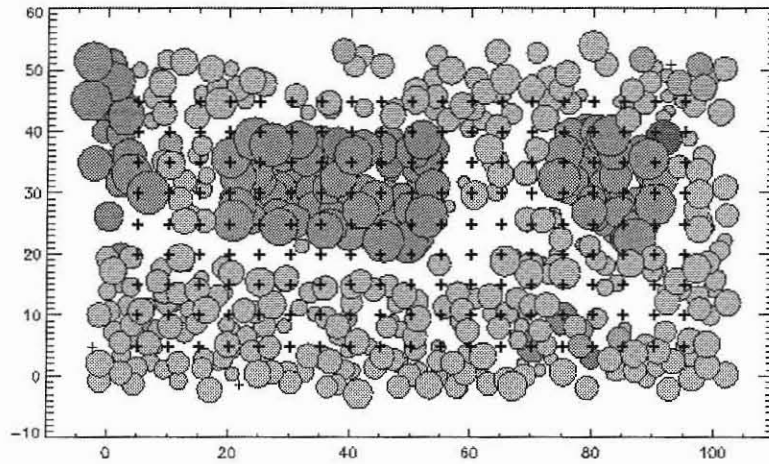


Abbildung 5: Bestandesplan der Parzelle 1 der Wuchsreihe Freising 813. Die Meßpunkte sind als Kreuze markiert. Auf dieser Fläche befinden sich zwei Buchengruppen, die in diesem Plan durch die dunkleren Kronen gekennzeichnet sind.

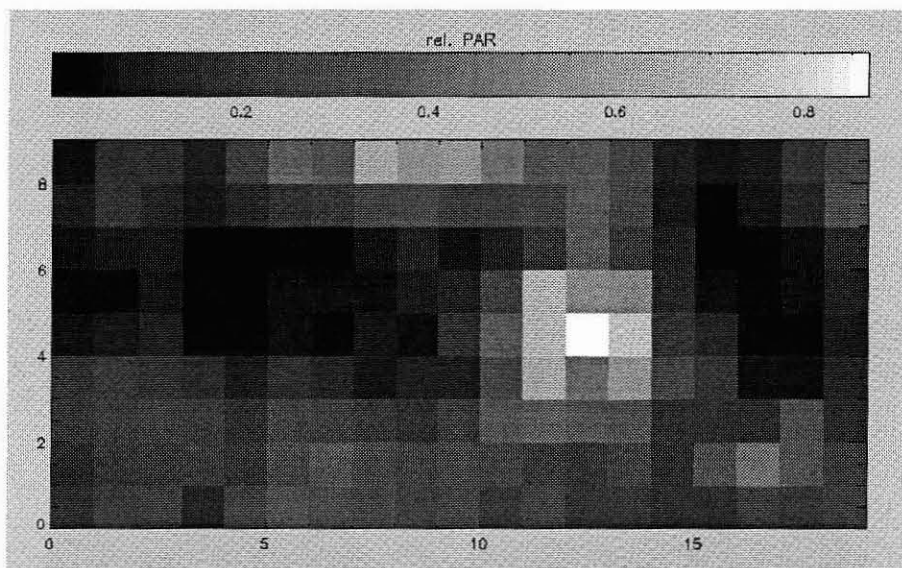


Abbildung 6: PAR-Strahlungsmessung auf Parzelle 1 der Fichten Buchen Wuchsreihe Freising 813. Die Werte sind relativ zur Freilandstrahlung angegeben. Der helle Fleck bei den Koordinaten 13/5 kommt von einer Buche, die umgestürzt ist und so ein Loch in das Kronendach gerissen hat.

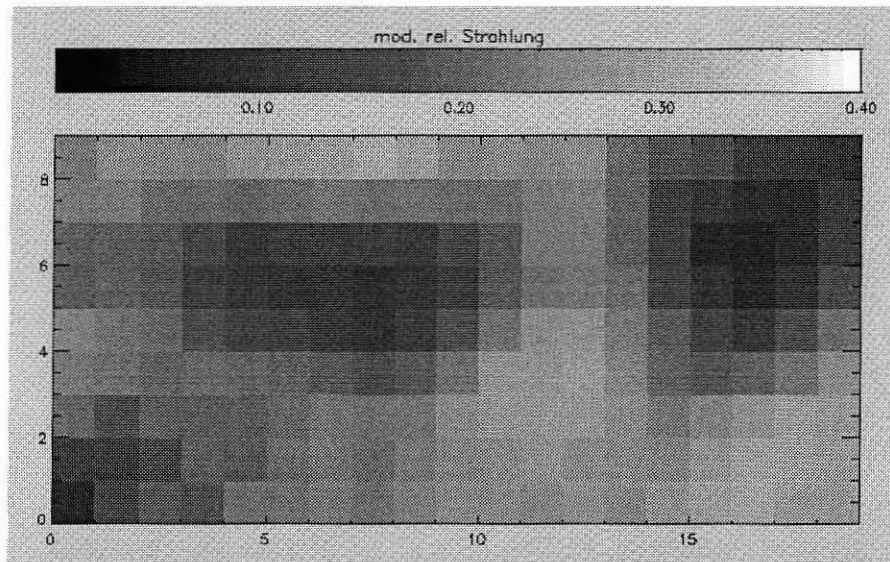


Abbildung 7: Modellierung der relativen Strahlung mit dem Bestandesstrahlungsmodell. Die Quadrate entsprechen den Rasterpunkten, die im Bestand angelegt worden sind. Sie haben einen Abstand von jeweils 5 Meter.

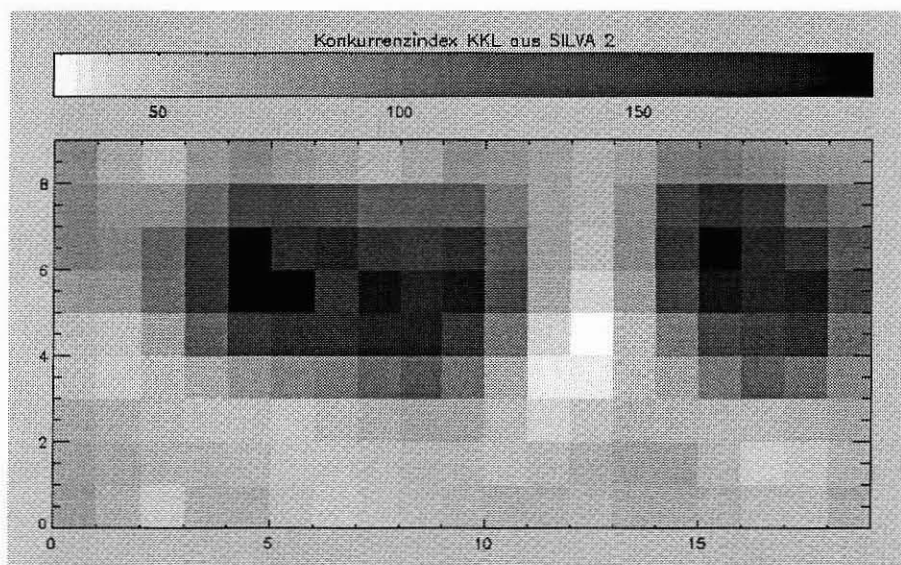


Abbildung 8: Mit dem Wachstumsmodell SILVA berechneter Konkurrenzindex. Da sich an den Meßpunkten keine Bäume befinden, wurden hier „virtuelle“ Bäumchen eingesetzt.

## **Literatur**

**Anderson, M.**, 1964: Light Relations of Terrestrial Plant Communities and their Measurement, Biological. Reviews., Vol. 39, Nr. 4, S. 425-487.

**Bartelink, H.**, 1995: MAPFLUX: a spatial model of light transmission through forest canopies, Hinkeloord Report No 15, Vakgroep Bosbouw, Landbouw-universiteit Wageningen, 30 Seiten.

**Knyzikhin, Yu.**, 1994: Optimization of solar radiation input in forest canopy as a tool for planting/cutting of trees, Transport Theory and Statistical Physics, Vol. 23, Nr. 5, S. 671-700.

**LI-COR**, 1991: Radiation Measurement Instruments, LMI-1291, Prospekt der Firma LI-COR inc.

**Pretzsch, H.**, 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände, Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 115.

**Pretzsch, H.**, 1995: Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs, Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Heft 9/10, S. 190-201.