

# Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen

E. SCHWALBE<sup>1</sup>, H.-G. MAAS<sup>1</sup>, S. WAGNER<sup>2</sup>, M. ROSCHER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Der Beitrag gibt einen Überblick über die Anwendung und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für die Ableitung photosynthetisch relevanter Strahlungswerte in Waldbeständen als Planungsgrundlage für Waldbaumaßnahmen. Die photogrammetrischen Arbeitsschritte innerhalb dieser Aufgabenstellung umfassen die Kalibrierung von Fischauge-Objektiven sowie die Segmentierung und Klassifizierung der Hemisphärenbilder hinsichtlich strahlungsrelevanter Bereiche.*

## 1 Einleitung

Die hemisphärische Photographie ist ein etabliertes Instrumentarium zur Bewertung der Strahlungssituation in Waldbeständen. Sie wird seit Ende der 50iger Jahre (EVANS & COOMBE, 1959) zur Beurteilung der Besonnungssituation von Bäumen bei der Bewertung von Standortfaktoren angewandt. Der deutliche Vorteil gegenüber der Verwendung konventioneller Strahlungssensoren liegt in der räumlich aufgelösten Erfassung der Kronenstruktur durch eine Momentaufnahme. Alternative Strahlungsmesser wie PAR-Sensoren dagegen erfassen die Strahlungssituation lediglich als einen integralen Wert für die gesamte Hemisphäre. Bislang basierten strahlungsökologischen Analysen mittels Hemisphärenbildern hauptsächlich auf analoger Photographie, wobei sich die Auswertung im Wesentlichen auf Schwellwertuntersuchungen in gescannten Schwarzweißbildern konzentrierte (DOHRENBUSCH, 1989; WAGNER, 1998). Mittlerweile sind digitale Kameras erhältlich, deren Auflösung und Format eine Umstellung auf hochauflösende digitale hemisphärische Bilder ermöglicht. Vorteile digitaler Aufnahmen sind eine höhere radiometrische Qualität, eine bessere Reproduzierbarkeit und ein effizienterer Datenfluss. Für die hier gezeigten Untersuchungen wird eine 4500x3000 Pixel Kamera mit einem 180°-Fischauge-Objektiv verwendet.

Für die Auswertung der Hemisphärenbilder ergeben sich zwei Aufgaben: Durch die Verwendung eines Fischauge-Objektivs wird eine geometrische Modellierung für die Transformation vom Bild in die Hemisphäre sowie die Entwicklung eines geeigneten Kalibrierverfahrens und Kalibrierraumes notwendig. Die Hauptaufgabe besteht in der Entwicklung geeigneter Segmentierungs- bzw. Klassifikationsverfahren zur Bestimmung strahlungsrelevanter Bereiche im Bild. Dazu wird untersucht, wie die multispektralen Informationen der drei Kanäle der RGB-Farbaufnahmen sowie Texturparameter genutzt werden können.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe, Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, e-mail: [ellen.schwalbe@mailbox.tu-dresden.de](mailto:ellen.schwalbe@mailbox.tu-dresden.de), [hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de](mailto:hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Prof. Dr. forest. habil. Sven Wagner, MSc. Forestry Manuela Roscher, Institut für Waldbau und Forstschutz, Technische Universität Dresden, Pienner Str. 8, 01737 Tharandt, e-mail: [wagner@forst.tu-dresden.de](mailto:wagner@forst.tu-dresden.de), [manuela.roscher.@forst.tu-dresden.de](mailto:manuela.roscher.@forst.tu-dresden.de)

## 2 Zielstellung

Das Ziel der Arbeiten ist es, waldbauliche Richtlinien für das Überleben, die Ansprüche und die Verschiedenartigkeit des Bodenbewuchses und von Jungpflanzen in Waldbeständen zu ermitteln. Eine hemisphärische Aufnahme von einem bestimmten Standpunkt innerhalb des entsprechenden Waldgebietes dient in erster Linie dazu, geometrische Informationen über die Struktur des Kronendaches abzuleiten. Aus dieser Information kann dann unter Anwendung meteorologischer Modelle, Strahlungsmodelle und der Simulation des Tages- und Jahresganges der Sonne über dem aufgenommenen Kronendach die photosynthetisch wirksame Strahlung ermittelt werden, die einer Pflanze an diesem bestimmten Standpunkt zur Verfügung steht.

Je genauer die Bereiche im Bild abgegrenzt werden können, welche für den Einfall von direkter Strahlung relevant sind, desto genauer können die Strahlungswerte verifiziert werden. Ziel ist somit die Generierung eines segmentierten Bildes, welches in bestmöglicher Genauigkeit die Abgrenzung des Kronendaches vom Himmel wiedergibt. Die Genauigkeit, mit der diese Abgrenzung geschehen kann, hängt im Wesentlichen vom Auflösungsvermögen der Kamera und von der Güte der verwendeten Segmentierungsroutine ab. Um die Methode zur Ermittlung von Strahlungsinformation auch in der Forstpraxis anwenden zu können, sind die Genauigkeitsanforderungen letztendlich auch auf ein praxisrelevantes Maß hin anzupassen. Hochauflösende Digitalkameras sind für die Praxis häufig zu teuer. Deshalb ist eine Segmentierung der Hemisphärenbilder im Subpixelbereich wünschenswert, um auch für geringere Auflösungen möglichst realitätsnahe Strahlungswerte ableiten zu können. Wichtig für die Praktikabilität der Methode ist auch deren Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Wetter- und Bestandssituationen.

## 3 Daten

### 3.1 Studiengebiete

Die Anforderungen an eine Segmentierungsroutine für die Hemisphärenbilder hängen wesentlich von den Baumarten des auszuwertenden Testgebietes, sowie von der Wettersituation zum Zeitpunkt der Aufnahme ab. Bei den hier untersuchten Studiengebieten handelt es sich zum einen um einen Fichtenreinbestand (vgl. Abb. 1a) und zum anderen um einen gemischten Laubbaumbestand (vgl. Abb. 1b).

Neben dem grundsätzlichen Unterschied zwischen Laub und Nadelwäldern sind Fichtenbestände auch im Vergleich zu anderen Nadelwaldbeständen vergleichsweise dunkel. Da die Aufnahmen relativ kurz zu belichten sind, so dass die hellen Bereiche im Bild nicht überstrahlen, werden die Bäume unterbelichtet und erscheinen sehr dunkel. Damit sind die einzelnen Kanäle aufgrund des Rauschens stärker miteinander korreliert und die multispektrale Information des Bildes ist nur eingeschränkt zur Segmentierung nutzbar. Die Aufnahme des Fichtenbestandes entstand bei homogen bewölktem Himmel.

Um Informationen über den Unterschied der Auswertung in Laubwäldern und bei wolkenlosem bzw. teilweise bewölktem Himmel zu gewinnen, wurde eine weitere Testaufnahme untersucht, die eben diesen Eigenschaften entspricht. Bei Laubbäumen hat zusätzlich zur Wettersituation auch die Jahreszeit einen wesentlichen Einfluss auf Segmentierungskriterien, der

sich nicht nur in der Belaubungsdichte der Bäume äußert, sondern auch in der Farbinformation der Blätter im Bild. Die hier vorliegende Aufnahme entstand im Herbst bei klarem Himmel.

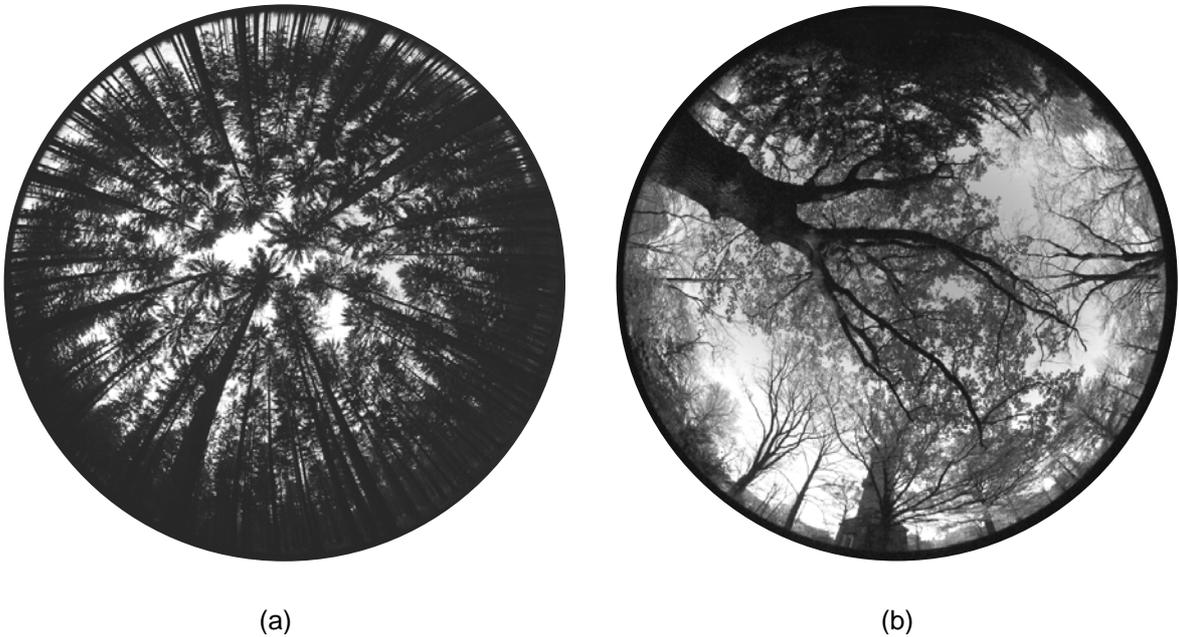


Abb. 1: Studiengebiete

### 3.2 Besonderheiten hemisphärischer Kronendachbilder

Hemisphärenbilder weisen spezielle Charakteristiken bezüglich der Konstanz der Intensität, wetterbedingter Variationen sowie der Dominanz des Blaukanals auf. Dies bedingt, dass selbst innerhalb eines Einzelbildes keine einheitliche spektrale Signatur für die Klasse Himmel definiert werden kann. Ursächlich dafür sind zum einen der Helligkeitsunterschied von der Bildmitte zum Bildrand hin, sowie ein Helligkeitsunterschied in azimuthaler Richtung, der abhängig ist vom Stand der Sonne. Des Weiteren ist die spektrale Signatur abhängig von der Wettersituation. Eine Extremsituation bietet sich in dieser Hinsicht bei teilweise bewölktem Himmel. Ein weiterer wesentlicher Punkt, der die Klassifikation in Hemisphärenbildern von der Klassifikation von Fernerkundungsdaten unterscheidet, ist die Dominanz des blauen Kanals bei Bildern, die bei wolkenfreiem Himmel aufgenommen wurden. Probleme treten deshalb an dünnen Ästen und Asträndern im Bild auf, die in einem dunklen Blau erscheinen.

Da jedes Hemisphärenbild des Kronendaches einer Gegenlichtaufnahme entspricht, ist die Belichtung problematisch (vgl. Abb. 2). Wird zu lange belichtet, überstrahlen kleine Äste, wird zu kurz belichtet, geht Information über sehr kleine lichtdurchlässige Stellen im Kronendach verloren. Wenn keine Kamera mit entsprechendem Dynamikumfang zur Verfügung steht, besteht eine Möglichkeit zur Kompensierung dieses Informationsverlustes in der Verwendung zweier Aufnahmen unterschiedlicher Belichtungsdauer. Problematisch bei der Nutzung mehrerer Bilder ist jedoch, dass der Zeitunterschied zwischen den Aufnahmen schon zu einer Strukturänderung des Kronendaches geführt haben kann und sich einzelne Äste aufgrund von Windbewegung in den zwei Bildern an verschiedenen Positionen befinden. Unter

diesen Aspekten soll zunächst die Verwendbarkeit der Klassifizierungswerkzeuge kommerzieller Softwarepakete zur Segmentierung bzw. Klassifizierung der Hemisphärenbilder diskutiert werden.

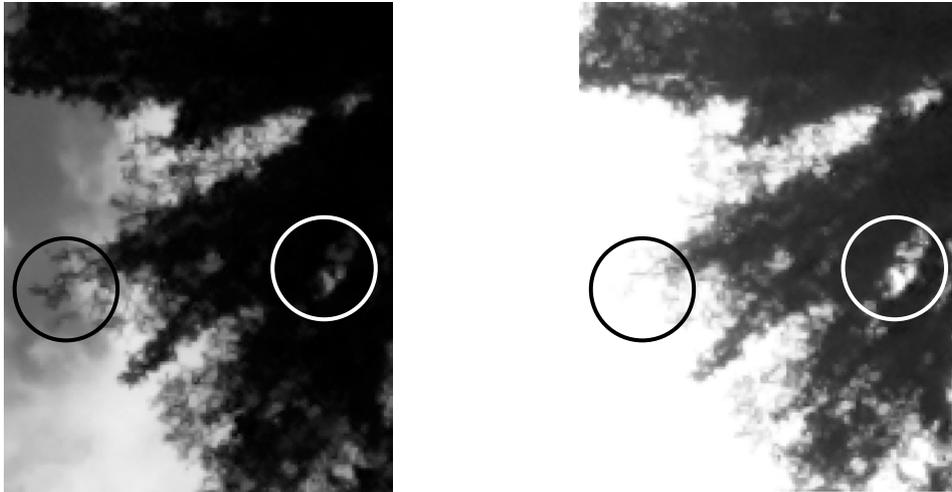


Abb.2 Informationsverluste bei unterschiedlicher Belichtung

## 4 Segmentierungs- und Klassifikationsmöglichkeiten mit kommerzieller Bildverarbeitungssoftware

Die Klassifikation der Hemisphärenbilder erfolgt generell in die zwei Hauptklassen Himmel und Vegetation. Als eine dritte Klasse wird gegebenenfalls die Klasse der Mischpixel definiert, welche Pixel enthält, die sich nicht eindeutig bzw. nur partiell einer der beiden Hauptklassen zuordnen lassen. Für diese Mischpixel soll in zukünftigen Untersuchungen geprüft werden, inwieweit sie zur subpixelgenauen Klassifizierung weiterverwendet werden können.

Die Quantifizierung der Qualität der klassifizierten Hemisphärenbilder ist schwierig, da keine konkret zählbaren Objekte separiert werden. Eine Beurteilung kann derzeit lediglich über einen subjektiven visuellen Vergleich von einzelnen Regionen des Originalbildes mit dem klassifizierten Bild erfolgen und über die Häufigkeit von Fehlklassifikationen, die durch diesen Vergleich erkannt werden. Zukünftige Arbeiten werden zusätzlich die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und den Vergleich mit PAR-Sensoren betrachten.

### 4.1 Klassifikationsmöglichkeiten mit ENVI

Die Bildverarbeitungssoftware ENVI bietet verschiedene Arten überwachter Klassifikation. Dabei erwies sich eine zuverlässige Klassifikation aufgrund der Inhomogenität der Klasse Himmel als schwierig. Die zufriedenstellendsten Ergebnisse konnten hier mit der *Maximum Likelihood* Klassifikation erreicht werden. Um auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Klasse Himmel im Bild einzugehen, wurden zunächst ca. 7-10 verschiedene Klassen Himmel definiert. In Bildern, die nicht bei homogen bewölktem Himmel aufgenommen wurde, erhöht sich die Anzahl der notwendigen Klassen aufgrund der größeren Inhomogenität des Himmels.

Die Eigenschaften jeder dieser Klassen wurden anhand von Trainingsgebieten im Bild festgelegt. Schließlich ist ein Schwellwert zu definieren, der aussagt, dass Pixel, deren Wahrscheinlichkeit, mit der sie zu einer Klasse gehören, für alle Klassen unter diesem Schwellwert liegt, als unklassifiziert eingestuft werden. Diese unklassifizierten Pixel bilden schließlich die Klasse Vegetation, welche in Abbildung 3b und 3c schwarz dargestellt ist. Alle Himmelsklassen werden zu einer gemeinsamen Klasse zusammengefasst (vgl. Abb. 3c). Die Abgrenzung zwischen den Klassen Himmel und Vegetation wird auf diese Weise subjektiv über die Definition von Steuerparametern vorgenommen. Die Einführung einer dritten Klasse, welche die Mischpixel repräsentiert, ist hier nicht praktikabel, da die spektralen Eigenschaften der einzelnen Pixel, die zu dieser Klasse gehören, sehr differenzieren und so häufig Fehlklassifikationen verursachen.

Problematisch ist, besonders bei Hemisphärenbildern von Laubwäldern, dass Blätter und Äste im Bild existieren, die aufgrund ihrer Ausrichtung viel Licht reflektieren. Diese Bereiche werden häufig fälschlich als Himmel klassifiziert, da sie ähnliche spektrale Eigenschaften besitzen.

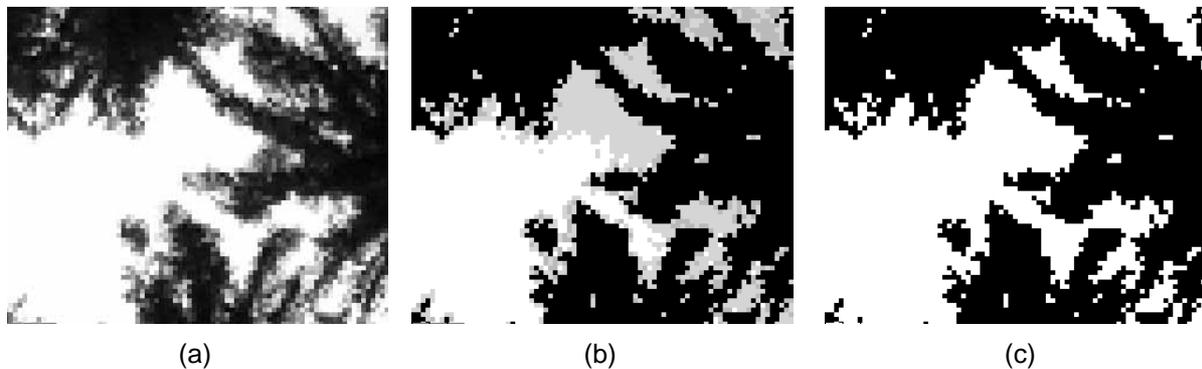


Abb.3 Überwachte Maximum Likelihood Klassifizierung

## 4.2 Klassifikationsmöglichkeiten mit eCognition

Die Software eCognition bietet die Möglichkeit, objektorientierte Klassifikationen durchzuführen. Ein Überblick über die Wirkungsweise und praktische Anwendbarkeit der Software wird in (LEUKERT, 2002) gegeben. Der Arbeitsvorgang bei eCognition unterteilt sich in die zwei Schritte Segmentierung und Klassifikation. Für die Segmentierung ist zunächst für die einzelnen Bildkanäle eine Gewichtung vorzunehmen. Die drei Kanäle wurden dabei gleich gewichtet. Bei unbewölktem Himmel bietet es sich an, den blauen Kanal stärker zu gewichten. Die Segmentierung erfolgt über die Homogenitätskriterien Farbe und Form und ist somit texturbasiert. Für die Hemisphärenbilder ist das Homogenitätskriterium Farbe maßgeblich, da das Kronendach des abgebildeten Waldgebietes keine definierbaren geometrischen Formen enthält, nach denen segmentiert werden könnte. Der *Scale Parameter* beeinflusst die Größe der Segmente, die gebildet werden. Er sollte möglichst klein gewählt werden, um die Detailliertheit im Bild auch in den Segmenten zu bewahren. Aus einer großen Fläche freien Himmels wird ein entsprechend großes Segment gebildet. Zwischen den Ästen und Zweigen der Baumkronen existieren jedoch auch häufig einzelne Pixel, welche ebenfalls der Klasse Himmel entsprechen. Damit auch diese im Einzelnen erfasst werden können, hat sich ein *Scale Parameter* von 5 als günstig erwiesen.

Die Klassifizierung der segmentierten Bereiche erfolgte in die Klassen Himmel und Mischbereich. Alle nicht klassifizierten Pixel wurden als Vegetation definiert. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Klassifikation mit eCognition. Die Klasse Himmel ist im Beispiel grau dargestellt, alle Pixel, die als gemischte Pixel identifiziert wurden, erscheinen im Bild weiss, und der dunkle unklassifizierte Bereich enthält diejenigen Pixel, die mit großer Wahrscheinlichkeit zu Bäumen gehören. Als aussagekräftigstes Kriterium zur Klassifizierung diente letztlich die Objekteigenschaft Helligkeit. Geometrische Eigenschaften wie Flächengrößen oder Umrisslängen der Segmente sind dagegen nicht als Klassifikationskriterien geeignet.

Deutliche Klassifizierungsprobleme treten bei überstrahlten Ästen und durch die inhomogene Helligkeit des Himmels in den verschiedenen Bereichen des Bildes auf. Deshalb werden am Bildrand häufig Pixel als Mischpixel klassifiziert, obwohl es sich um reine Himmelspixel handelte.

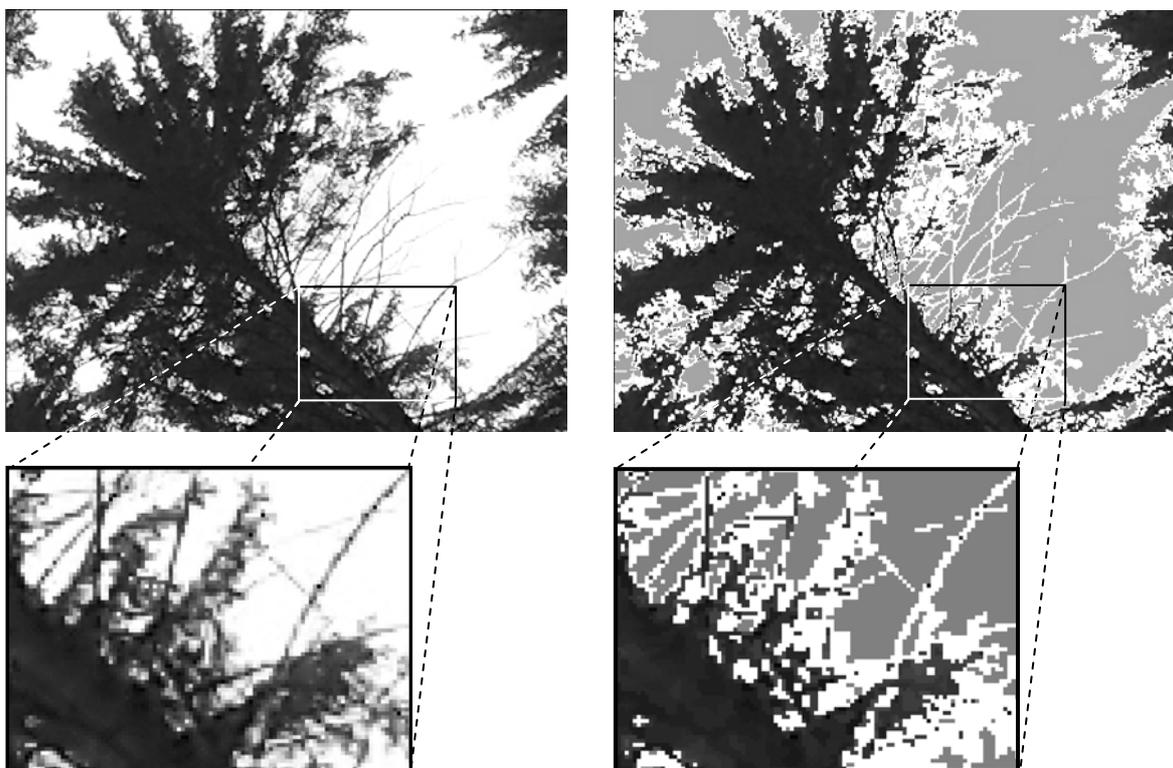


Abb.4 Ausschnitt eines segmentierten Hemisphärenbildes im Vergleich mit dem Originalbild

## 5 Geometrische Modellierung

Neben der Segmentierung der Bilder erfolgt die Modellierung der geometrischen Abbildungseigenschaften des Fischaug-Objektivs. Das Ziel der Kalibrierung des Fischaug-Objektivs ist es die Möglichkeit zu schaffen, für ein segmentiertes Hemisphärenbild einen Raumbezug herstellen zu können. Der Raumbezug der Bilder soll realisiert werden, indem für die einzelnen Pixel sphärische Koordinaten bestimmt werden. Des Weiteren dient die Kalibrierung der Modellierung von systematischen Abweichungen, die z.B. durch Objektivverzerrung und die Kameraparameter entstehen.

Die Besonderheit bei Aufnahmen mit einem Fischauge-Objektiv liegt in der Tatsache, dass es sich nicht um zentralperspektivische Abbildungen handelt und die Kollinearitätsgleichung somit nicht als Abbildungsfunktion verwendet werden kann. Die Fischaug-Projektion beruht idealerweise auf dem Prinzip, dass der Abstand eines Bildpunktes vom Bildhauptpunkt in linearer Abhängigkeit zum Winkel des einfallenden Strahles vom entsprechenden Objektpunkt steht.

Die Kalibrierung der Kamera erfolgt mittels Rückwärtsschnitt unter Verwendung eines Einzelbildes. Dazu wurde ein Kalibrierraum eingerichtet, der mit Punkten ausgestattet ist, deren 3D-Koordinaten bekannt sind (vgl. Abb. 5). Die Punkte wurden dabei so verteilt, dass sie sich im Hemisphärenbild auf konzentrischen Kreisen abbilden. Die Abstände benachbarter Punkte auf den jeweiligen Kreisen sind gleich. Damit wird eine formatfüllende und gleichmäßige Verteilung der Punkte über den Bildbereich gewährleistet. Als Marken wurden im mittleren Bildbereich Codemarken verwendet, im Randbereich des Bildes jedoch unkodierte Marken, da hier die Verzeichnung zu groß ist, um Codemarken auswerten zu können. Das noch zu implementierende mathematische Modell der Kalibrierung basiert auf einer Transformation von Bildkoordinaten in sphärische Koordinaten und der Definition von Zusatzparametern zur Kompensation systematischer Abweichungen.

Ist die innere Orientierung der Kamera einschließlich der Verzeichnungsparameter bekannt, können die sphärischen Koordinaten der Pixel im Koordinatensystem der Kamera bestimmt werden. Für die Weiterverarbeitung der segmentierten Bilder ist es gegebenenfalls von Interesse, eine automatische Bestimmung der Orientierung des Sensors im Raum abzuleiten. Unter der Orientierung ist dabei die Bestimmung der Abweichung der Sensorebene von der Horizontalebene zu verstehen sowie die Einnordung des Sensors. Gegenwärtig erfolgt die Orientierung des Sensors unter Verwendung von Libellen und eines Kompasses.

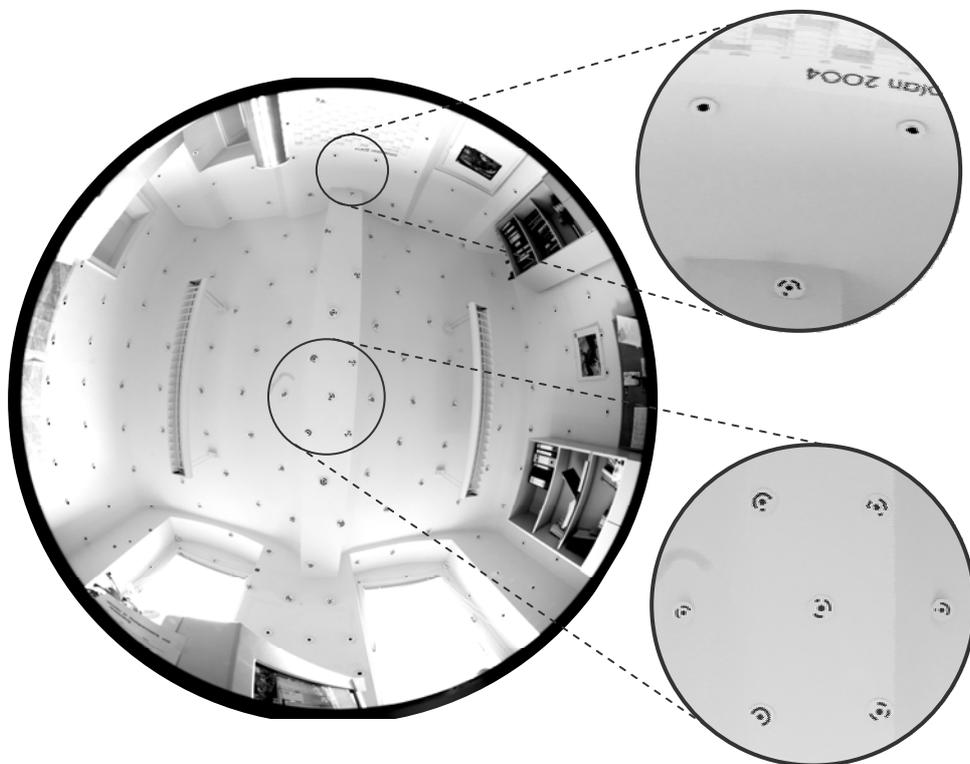


Abb.5 Kalibrierraum

## 6 Resultate und Ausblick

Generell kann ausgesagt werden, dass die Ergebnisse der Klassifikation von Hemisphärenbildern mit kommerzieller Bildverarbeitungssoftware den gegebenen Genauigkeitsanforderungen noch nicht vollständig gerecht werden. ENVI bietet mehrere Möglichkeiten der überwachten Klassifizierung, welche aber alle hinsichtlich der Detailgenauigkeit und Zuverlässigkeit eingeschränkt sind. Da die Software für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten konzipiert ist, lassen sich die besonderen Eigenschaften der Hemisphärenbilder nicht umfassend genug berücksichtigen. Die Auswertung der Hemisphärenbilder mit eCognition bietet gute Segmentierungsergebnisse, ist aber in Bezug auf die Klassifikation ebenfalls durch die Tatsache eingeschränkt, dass die Klasse Himmel so vielfältige Eigenschaften besitzen kann. Daher wird ein eigenständiger, an diese Eigenschaften angepasster Segmentierungs- bzw. Klassifizierungsansatz zu entwickeln sein. Dieser sollte eine Adaptierbarkeit auf einzelne Wettersituationen und Waldarten ermöglichen, da jede Baumart und Wettersituation individuelle Segmentierungs- und Klassifizierungsparameter bedingt.

Die Erkenntnisse, die aus dem Versuch der Klassifizierung mittels kommerzieller Software gewonnen werden konnten, sind bei der Entwicklung eines angepassten Segmentierungsansatzes zu berücksichtigen. Es ist auch zu untersuchen, in wieweit die Ergebnisse der Klassifikation mittels Bildbearbeitungssoftware als Grundlage für eine verfeinernde Klassifikation verwendet werden können. Um die Helligkeitsunterschiede des Himmels im Bild zu kompensieren, ist die Einteilung des Bildes in einzelne Sektoren und die lokale Untersuchung derselben vorteilhaft. Mögliche Ansätze zur Segmentierung bzw. Klassifizierung sind die Verwendung eines *Region Growing* Algorithmus, einer automatischen und lokalen Schwellwertgenerierung mittels Histogrammanalyse sowie eine Klassifizierung auf Grauwertprofilen.

## 7 Danksagung

Die Arbeiten zu diesem Projekt werden von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert (Forschungsprojekt: 170801/33). Weiterhin danken wir dem Institut für Waldbau und Forstschutz der Technischen Universität Dresden für die Zusammenarbeit in diesem Projekt.

## 8 Literaturverzeichnis

EVANS, G.C., COOMBE, D.E., 1959: Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. - *Journal of Ecology*, Jg. 47, S. 103-113.

DOHRENBUSCH, A., 1989: Die Anwendung fotografischer Verfahren zur Erfassung des Kronenschlußgrades. - *Forstarchiv*, Jg. 60, S. 151-155.

LEUKERT, K., 2002: Untersuchungen zur Segmentierung von Satellitenbilddaten für die Extraktion von GIS-Objekten. - *Publikationen der DGPF*, Band 11, S. 237-244.

WAGNER, S., 1998: Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. - *Agricultural and Forest Meteorology*, Jg. 90, Nr. 1/2, S. 103-117.