



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Identifikation von Vitalitätskenn- werten mittels digitaler Luftbilddaten“ Untersucht an einem Traubeneichenbestand

vorgelegt von

Diplom Geologe Gerd Anders

up50110, UNIGIS MSc Jahrgang 2003

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Schwerin, 23.04.2006

Danksagung

Folgenden Personen und Institutionen möchte ich danken, dass sie zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben:

Meinen Betreuern

Prof. Dr. Josef Strobl von der Universität Salzburg, UNIGIS Zentrum für Geoinformatik

Herrn Kai Jütte von der Landesforstanstalt - Anstalt öffentlichen Rechts - Mecklenburg-Vorpommern, Betriebsteil Schwerin

Landesforstanstalt - Anstalt öffentlichen Rechts - Mecklenburg-Vorpommern, Betriebsteil Schwerin

Herr R. Lehniger

Herr H. Schulz,

Datenverarbeitungszentrum Mecklenburg-Vorpommern

Herr H. Rechlin

meiner Lebensgefährtin

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	11
2.	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	12
3.	STAND DER FORSCHUNG	13
4.	UNTERSUCHUNGSGEBIET FORSTLICHE DAUERBEOBACHTUNGSFLÄCHE „GÖHRENER TANNEN“	15
5.	METHODEN UND MATERIALIEN	17
5.1.	Bildflug	17
5.2.	Digitale Datenerfassung	18
5.2.1.	Grundlagen der digitalen Bilderfassung	18
5.2.2.	Digitale Luftbildkamera UltraCAM _D	20
5.3.	Terrestrische Datenerfassung	22
5.3.1.	Auswahl der Bäume zur Auswertung	24
5.4.	Erstellung der Ortholuftbilder	26
5.5.	Luftbildauswertung	28
5.5.1.	Digitalisierung der Kronenumrisse	28
5.5.1.1.	Stereobildauswertung	28
5.5.1.2.	Kronenbezogene Erfassung der Grauwertverteilung	29
5.6.	Statistische Untersuchungen	32
5.6.1.	Datenzusammenstellung / -aggregation mittels DBMS	32
5.6.2.	Auswertung mittels Statistiksoftware SPSS	34
5.6.2.1.	Grauwertverteilung in Abhängigkeit von der Schadstufe für Einzelkronen	35
5.6.2.2.	Grauwertverteilung innerhalb der Quadranten der Einzelkronen	36
5.6.2.3.	Grauwertverteilung für Einzelkronen in den verschiedenen ausgewerteten Einzelluftbildern	37

6.	ERGEBNISSE	38
6.1.	Grauwertverteilung innerhalb der Gesamtkronen	38
6.1.1.	Einzelbilder	38
6.1.2.	Mosaikiertes Gesamtbild	42
6.2.	Grauwertverteilung innerhalb der Zentrumspixel	44
6.2.1.	Einzelbilder	45
6.2.2.	Mosaikiertes Gesamtbild	46
6.3.	Grauwertverteilungen in den Quadranten der Kronen	48
6.4.	Grauwertverteilung je Schadstufe in den verschiedenen Luftbildern	49
6.5.	Methode zur Berechnung der Schadstufen	50
7.	DISKUSSION	54
8.	ZUSAMMENFASSUNG	61

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
VI _{DIFF}	Differenzkanal ROT - GRÜN
AOI	Area of Interest
BHD	Brusthöhdurchmesser
CIR	Colour infrared
DD	Differenz-Differenz-Vegetationsindex
k.A.	Keine Angaben
LuPA	Luftsichtbarer Passpunkt
NBV	Nadel- Blattverlust
NDVI	Normalisierter Differenz-Vegetationsindex
NIR	Nahes Infrarot
PK	Probenkreis
RVI	Ratio-Vegetationsindex
SDST	Schadstufe
TNDVI	Transformed Normalized Vegetation Index
VG	Vergilbung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Lage der Flugstreifen in Bezug auf das Untersuchungsgebiet	18
Abbildung 2	Signal in Abhängigkeit von der Belichtung für einen Film (Drei-Photonen-Korn) und einen CCD-Sensor (SANDAU; 2005)	19
Abbildung 3	Anordnung der Einzelsensoren in der UltraCAM _D	21
Abbildung 4	Grundprinzip des Bündelblockausgleichs mit homologen Punkten und deren Strahlengängen (KRAUS, 1997)	27
Abbildung 5	beispielhafte Fotos von Bäumen im Luftbild (rechts) und terrestrisch (links)	29
Abbildung 6	Lage der Quadranten innerhalb einer Krone	33
Abbildung 7	Histogramm des NIR – links mit Schadstufe 0 beginnend bis Schadstufe 4 (Einzelbilder)	39
Abbildung 8	Reflexionseigenschaften von Blättern, Ästen und Boden mit Angabe der 4 Spektralbereiche der UltraCAM _D	40
Abbildung 9	Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Kanäle ROT, GRÜN, BLAU und NIR (mit linearem Trend NIR), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder	41
Abbildung 10	Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Vegetationsindizes RVI (mit linearerem Trend), NDVI und TNDVI, alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder	41
Abbildung 11	Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Vegetationsindizes DD und GRÜN-ROT, alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder	41
Abbildung 12	Histogramme (NIR) – links mit Schadstufe 0 beginnend bis Schadstufe 4 (mosaikiertes Gesamtbild)	42
Abbildung 13	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den NIR-Kanal (mit linearem Trend), alle Angaben für mosaikiertes Gesamtbild	43

Abbildung 14	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für mosaikiertes Gesamtbild	44
Abbildung 15	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für das NIR (mit linearem Trend), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder-Zentrumspixel	45
Abbildung 16	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder-Zentrumspixel	46
Abbildung 17	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für das NIR (mit linearem Trend), alle Angaben für Zentrumspixel mosaikiertes Gesamtbild	47
Abbildung 18	Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für Zentrumspixel mosaikiertes Gesamtbild	47
Abbildung 19	variierender Blickwinkel auf eine Krone in den aufeinander folgenden Einzelaufnahmen (Prinzipskizze)	48
Abbildung 20	Lage der Mediane der Schadstufen zum Median der Gesamtmenge aller ausgewerteten Pixel	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bestandesbeschreibung (Datenspeicher Wald, Stand 2005)	16
Tabelle 2	Spektrale Auflösung der UltraCAM _D in den verschiedenen Kanälen	21
Tabelle 3	Herleitung der Schadstufe aus den Klassen der Merkmale Nadel- / Blattverlust und Vergilbung	23
Tabelle 4	Im Rahmen der Arbeit ausgewertete Bäume mit Zuordnung zu Schadklassen	25
Tabelle 5	Angaben zur Sichtbarkeit der Einzelbäume in den verschiedenen Luftbildern	32
Tabelle 6	prozentuale Abweichungen der Einzelmediane vom Gesamtmedian (Gesamte Krone)	52
Tabelle 7	prozentuale Abweichungen der Einzelmediane vom Gesamtmedian (Zentrumspixel)	53
Tabelle 8	Spannen für die Abweichung der Mediane der Schadstufen vom Gesamtmedian	53

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR, nur Einzelbilder in Abhängigkeit von den Schadstufen	66
Anlage 2	Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index, nur Einzelbilder in Abhängigkeit von den Schadstufen	67
Anlage 3	Statistische Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR, nur mosaikiertes Gesamtbild in Abhängigkeit von den Schadstufen	68
Anlage 4	Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index, nur mosaikiertes Gesamtbild in Abhängigkeit von den Schadstufen	69
Anlage 5	Statistische Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel der Einzelbilder)	70
Anlage 6	Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel der Einzelbilder)	71
Anlage 7	Stat. Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes)	72
Anlage 8	Stat. Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes)	73
Anlage 9	Mittelwert der Grauwertverteilung (NIR) beispielhaft für je einen Baum pro Schadstufe	74
Anlage 10	Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den Ratio-Vegetationsindex RVI in Abhängigkeit von den Schadstufen (gesamte Krone)	75
Anlage 11	Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den NIR-Kanal in Abhängigkeit von den Schadstufen (gesamte Krone)	75
Anlage 12	Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den Ratio-Vegetationsindex RVI in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel)	76

Anlage 13 Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den NIR-Kanal in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel)

76

1. Einleitung

Die heutigen Anforderungen der Gesellschaft an die Forstwirtschaft sind von gegensätzlichen Ansprüchen geprägt. In Zeiten einer Verknappung der die Basis unserer Energiewirtschaft bildenden Ölreserven wird Holz als nachwachsender Rohstoff zunehmend wieder in die Betrachtungen zur Sicherung der Energiebasis einbezogen. Gleichfalls führt der sich verstärkende globale Klimawandel zu Überlegungen, wie diese Tendenz aufzuhalten bzw. umzukehren ist. Den Wäldern wird dabei als CO₂-Senken eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Diese Funktion können Wälder jedoch nur dann erfüllen, wenn sie nicht selbst durch biotische und abiotische Einflüsse geschädigt sind.

Die alljährlichen Waldschadensberichte zeigen aber, dass der Wald beispielsweise in Deutschland zu 31% stark geschädigt ist. Die Ursachen dafür sind vielgestaltig, lassen sich jedoch prinzipiell auf einerseits bestehende Belastungen durch Schadstoffe in den Medien Luft, Boden, Grundwasser sowie auf Auswirkungen des Klimawandels wie extreme Trockenheit z. B. im Jahr 2003 zurückführen. Diese abiotischen Einflüsse bewirken gleichzeitig eine Intensivierung der biotischen Schäden.

Für die Forstverwaltungen der Länder ergeben sich damit hohe Anforderungen. Sie müssen sicherstellen, dass der Wald auch für zukünftige Generationen der Vielzahl seiner Funktionen gerecht werden kann.

Die Landesforstverwaltung Mecklenburg-Vorpommern fühlt sich den Grundsätzen des ökologischen Waldbaus verpflichtet. Daraus ergeben sich vielfältige Anforderungen. Neben den rein waldbaulichen Verpflichtungen steht auch die Frage des ökologisch angepassten Einsatzes von Chemikalien zur Bekämpfung von biotischen Waldschäden im Vordergrund. Dies bedingt das schnelle und effektive Erkennen von Schadereignissen und deren zielgerichtete Bekämpfung, um so die Menge des notwendigen Chemikalieneinsatzes optimieren zu können.

Neben den rein ökologischen Überlegungen ist selbstverständlich eine ökonomisch sinnvolle Verwendung der zur Verfügung stehenden Steuermittel ein Gebot der Zeit. Althergebrachte Methoden zur Gewinnung der Waldschadensdaten müssen in Frage gestellt werden, modernere Methoden effektiviert und teilweise gänzlich neue Wege beschritten werden.

Unter diesen Gesichtspunkten ist die Fernerkundung eine an Bedeutung zunehmende Methode zur Gewinnung von Daten über den Waldzustand. Neue technische Möglich-

keiten wie die digitale Fotografie lassen eine Steigerung der Effizienz durch die Automatisierung von Auswerteverfahren als möglich erscheinen.

2. Problemstellung und Zielsetzung

Die steigenden Anforderungen an die Forstverwaltungen bei gleichzeitiger Verringerung der zur Verfügung stehenden Finanzen, verlangen den Einsatz von effizienteren Mitteln und Methoden zur Bewirtschaftung des Waldes. Ein Erfordernis zur Durchsetzung dieser Ziele, ist die zeitnahe Bereitstellung von Informationen über alle Aufgabebereiche der modernen Waldwirtschaft. Die bisherigen Wege der Informationsgewinnung erweisen sich dabei zunehmend als nicht schnell und nicht detailliert genug. Weiterhin beeinflussen subjektive Faktoren die Informationsgewinnung und lassen die Vergleichbarkeit erhobener Daten problematisch erscheinen. Dies trifft insbesondere auf den Bereich der Beschreibung und Erfassung von Waldzustandsdaten zu. Hier bietet sich die Verwendung von Luftbildern in einem erweiterten Maße an. Die gegenwärtig aus Luftbildern gewonnenen Daten beziehen sich hauptsächlich auf strukturelle Informationen wie z. B. die Waldeinteilung. Die Erhebung der mindestens genauso wichtigen Aussagen zur Pflanzenphysiologie ist dagegen deutlich unterrepräsentiert. Verursacht wird dies durch die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten, insbesondere deren spektraler und radiometrischer Auflösung. Es war bislang beispielsweise nur bedingt möglich, digitale Luftbilder mit einer optischen Auflösung von 10 cm bei einer Datentiefe von 12bit verwenden zu können. Damit verschlossen sich aber auch digitale Auswertungen des Zustandes einzelner Baumkronen. Die vielfach erhältlichen digitalen Aufnahmen wurden durch Scannen analoger Bilder erstellt und wiesen damit nur scheinbar eine Datentiefe >1bit auf.

Die Einsatzreife hochauflösender digitaler Luftbildkameras verspricht durch die hohe optischen Auflösung und eine Datentiefe von 12bit gänzlich neue Möglichkeiten. Für diese Daten existieren nur wenige Analysen hinsichtlich ihrer Verwendung zur automatischen Erhebung von Waldzustandsdaten, insbesondere zur Betrachtung von Einzelkronen.

Die Vitalität einer Krone lässt sich mittels Luftbilddatenauswertung prinzipiell auf zwei Wegen bestimmen. Einerseits kann die gesamte Kronenfläche zur Bestimmung herangezogen werden oder die Bestimmung erfolgt für einen repräsentativen Teilbereich der Krone. Hier bietet sich ein Areal um den höchsten Punkt der Krone an. Für das Erkennen

der gesamten Kronenfläche werden gegenwärtig Algorithmen erarbeitet, die jedoch einen relativ hohen Rechenaufwand erfordern. Erfolgt die Bestimmung über Teilbereiche von Kronen, so verringert sich der Rechenaufwand enorm, da nur lokale Höhenmaxima bestimmt werden müssen. Von diesen ausgehend wird ein definierter Umkreis zur Bestimmung von Vitalitätskennziffern herangezogen.

Aus der geschilderten Sachlage ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende konkrete Forschungsaufgaben:

- Erhebung von Reflexionsspektren für ausgewählte Baumindividuen einer forstlichen Dauerbeobachtungsfläche mittels analoger Erfassung der Kronenumrisse aus digitalen Luftbildern
- Berechnung verschiedener Vegetationsindizes für alle Einzelpixel einer Kronen bzw. für Teile von Kronen
- Berechnung von statistischen Kenngrößen für Einzelkronen bzw. Teile von Einzelkronen
- Untersuchungen von Zusammenhängen (Korrelationen) zwischen Vegetationsindizes / statistischen Kenngrößen und der Kronenvitalität

3. Stand der Forschung

Die Bedeutung des Erkennens und Erfassens von Waldzustandsdaten mittels Luft- und Satellitenbildern ist seit ihrem Vorliegen unbestritten. Insbesondere die Arbeiten von Henninger und Hildebrandt (1980), Hildebrandt (1996) und Pröbsting (1996) geben einen umfassenden Überblick.

Erfolgte in den Anfangsjahren der Fernerkundung die Auswertung überwiegend visuell durch speziell geschultes Personal, so wurde bereits Anfang der 70er Jahre mit der besseren Verfügbarkeit von Großrechnerkapazität der Versuch unternommen, die Interpretation zu automatisieren. Insbesondere die Verfügbarkeit erster multispektraler Scannerdaten (LANDSAT) ab 1980 revolutionierte die Entwicklung von Methoden für die digitale Bildbe- und -verarbeitung. Die aufgenommenen Szenen wiesen, im Gegensatz zur fotografischen Aufnahme, eine Datentiefe von >1bit auf.

Digitale Techniken blieben bis zur Einsatzreife von Luftbildkameras mit Halbleiterdetektoren vorwiegend auf den Bereich der satellitengestützten Bildgewinnung beschränkt.

Der Einsatz von Luftbildern in der Forstwirtschaft geht bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Bereits damals wurde u. a. das Gewinnen von Aussagen zur Vitalität von Waldbeständen als Ziel von Untersuchungen formuliert (HILDEBRANDT, 1996).

Erfolgte bis in die 80er Jahre des 20. Jahrhunderts vorrangig eine visuelle Interpretation der Luftbilder, so ermöglichte später der verstärkte Einsatz von Computertechnik andere Wege zu gehen. Während in vielen Bereichen der Luftbildinterpretation strukturelle Aussagen, wie der Verlauf von geologischen Störungslinien oder lokale Abgrenzungen Ziel der Untersuchung sind, erfordert u. a. die Forstwirtschaft weitergehende Angaben. Eine wichtige Fragestellung ist die nach Vitalitätskennziffern von Waldbeständen bis hin zu Einzelindividuen.

Die Differenzierung zwischen gesunden und geschädigten Bäumen erfolgt auf der Grundlage von typischen Signalerhöhungen in Einzelkanälen oder dem Verhältnis von Kanälen zueinander. Die berechneten Kanalverhältnisse werden als Vegetationsindizes bezeichnet (HILDEBRANDT, 1996). Zur Bewertung der Berechnungsergebnisse sind immer Vergleichsmessungen notwendig, die eine empirische Zuordnung erlauben.

CHOEN (1988) führte Untersuchungen zur Ableitung des Kronenzustandes aus CIR-Luftbildern (Colour infrared images) durch und stellte Abhängigkeiten zwischen der Belaubung / Vergilbung und der optischen Dichte in Farbluftbildern fest. Auf diese Abhängigkeit hatte bereits KADRO (1981) hingewiesen. Er führte dazu aus: „... die artspezifischen und zustandsspezifischen (Wachstum, Welkeerscheinungen usw.) Zell- und Gewebestrukturen des Blattes ... für die Blattreflexion erhebliche Bedeutung besitzen.“. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden Untersuchungen zum Reflexionsverhalten von Blättern und Bäumen durchgeführt (BUSCHMANN und NAGEL, 1992). Es wurde nachgewiesen, dass unmittelbare Zusammenhänge zwischen Reflexionsspektren und physiologischen Schäden bestehen. Besondere Aussagekraft hat dabei das Nahe Infrarot (NIR).

Bisherige Untersuchungen gehen vorrangig von der Interpretation der Grauwertverteilung eines einzelnen Pixels aus.

Im Gegensatz zu dieser Betrachtung gehen FUCHS et al (2005) einen anderen Weg. Nicht die Grauwertverteilung an sich wird als Kennwert verwendet, sondern statistische Betrachtungen der Gesamtheit der Grauwertverteilungen im Bereich des zu untersu-

chenden Objektes. Beschreibende statistische Kenngrößen wie die Standardabweichung werden zur Interpretation herangezogen.

4. Untersuchungsgebiet Forstliche Dauerbeobachtungsfläche „Göhrener Tannen“

Forstliche Dauerbeobachtungsflächen (DBF) dienen der Untersuchung der Bestandesentwicklung über längere Zeiträume. Mit dem Auftreten der „Neuartigen Waldschäden“ in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurden spezielle DBF's eingerichtet, welche ausschließlich der Vitalitätsbeobachtung dienen.

Der Zustand der Baumkronen gilt als Kriterium der Vitalität von Bäumen. Diese weist eine enge Beziehung zu Farbe und Dichte der Belaubung bzw. Benadelung auf. Störungen innerhalb des Ökosystems Wald bzw. Schädigungen von Einzelindividuen zeigen sich frühzeitig u.a. an Nadel-/ Blattverlust und Vergilbung von Blättern / Nadeln.

Auf den DBF's werden diese Vitalitätsdaten in einem jährlichen Zyklus erhoben und darüber Aussagen zur Schädigung des Bestandes gewonnen. Durch die entstehenden Zeitreihen werden tendenzielle Aussagen zur Waldschädigung und zur Ermittlung der Ursachen der Waldschädigung ermöglicht.

Die Landesforstverwaltung des Landes Mecklenburg-Vorpommern unterhält eine Reihe von Dauerbeobachtungsflächen, auf denen die Erfassung von Vitalitätsdaten mit einem europaweit vereinheitlichten Stichprobenverfahren erfolgt.

Für die im Folgenden entwickelte Methode zur automatischen Schadstufenerkennung wurden Daten der forstlichen DBF „Göhrener Tannen“ herangezogen.

Die DBF „Göhrener Tannen“ wurde 1990 eingerichtet und befindet sich im Westen Mecklenburg-Vorpommerns im Randbereich des Müritznationalparks.

Klimatisch wird die Fläche zum Ostmecklenburg-Nordbrandenburger Seenplattenklima gezählt. Der Jahresniederschlag beträgt 600 - 630 mm bei einer Jahresmitteltemperatur von 7,9°C.

Der Standort befindet sich im Bereich der Endmoränenlandschaft des Pommerschen Stadiums der Weichselvereisung. Der den anstehenden Boden bildende Geschiebemergel ist durch glazifluviale Vorgänge nach Rückzug des Gletschers überformt worden. Dies führte zur Bildung der heutigen Morphologie. Das leicht kuppige Gelände weist Höhendifferenzen von 5 m im Untersuchungsgebiet auf.

Die 8,26 ha große DBF befindet sich hoheitlich im Forstamt Müritz National Park Revier Waldsee, Abteilung 6222, Unterabteilung A, Teilfläche 3.

Die Fläche ist mit Traubeneichen und Buchen im Oberstand bestockt. Der teilweise vorhandene Unterstand wird von Buchen aus Naturverjüngung gebildet (Tabelle 1).

Die Traubeneichen haben eine Mittlere Höhe von 34 m bei einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von 82 cm.

	Traubeneichen	Rotbuche	Rotbuche
	Oberstand	Oberstand	Unterstand
Alter	223	223	24
Höhe [m]	34,1	35,2	6,3
BHD [cm]	82	65	1

Tabelle 1: Bestandesbeschreibung (Datenspeicher Wald, Stand 2005)

Die Dauerbeobachtungsflächen setzen sich aus 12 Probenkreisen mit jeweils 10 Individuen zusammen. Die Mittelpunkte der Probenkreise stellen die Gitterpunkte eines Rasters von 100 m dar. Von diesen Mittelpunkten ausgehend werden die nächsten 10 Individuen ausgewählt. Kriterien für die Auswahl sind Gesundheitszustand und Ansprechbarkeit.

Die jährliche Erhebung findet regelmäßig in den Monaten Juli / August statt.

5. Methoden und Materialien

5.1. Bildflug

Im Auftrag des Landesamtes für Forsten und Großschutzgebiete wurde 2004 unter anderem die Dauerbeobachtungsfläche „Göhrener Tannen“ befliegen.

Die Befliegung erfolgte im Auftrag der Firma IFMS GmbH durch die Fa. Slagboom & Peeters Aerial Photography am 05.09.2004 mit einer Cessna Turbo C310R. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen betrug das Solar-Azimut $151,03^\circ$ und die Solar Altitude $39,49^\circ$. Der Bildflug fand in einer Flughöhe von 1.100 m über Grund bei sehr guten Witterungsbedingungen statt. Die effektive Bodenauflösung betrug im panchromatischen Bereich 0,1 m, im Farb-Bereich 0,2 m. Aus diesen Daten ergibt sich eine Bildgröße von 700 x 1.100 m. Eine Forderung war, die Bildwiederholfrequenz möglichst hoch zu halten um die Überlappungsbereiche groß zu gestalten. Erreicht wurde eine Überlappung von 80%.

Zum Einsatz kam die digitale Luftbildkamera UltraCam_D der Firma Vexcel (siehe Kapitel 5.2.2).

Zur Abdeckung des gesamten zu befliegenden Gebietes wurden 7 Flugstreifen in E-W bzw. W-E-Richtung befliegen. Der Abstand der Flugstreifen zueinander betrug ca. 660 m, was zur Überlappung der Bilder quer zur Flugrichtung von 30% führte (siehe Kap. 5.2.2). Je Flugstreifen wurden 105 Bilder aufgenommen, die Gesamtzahl der Bilder beträgt 735.

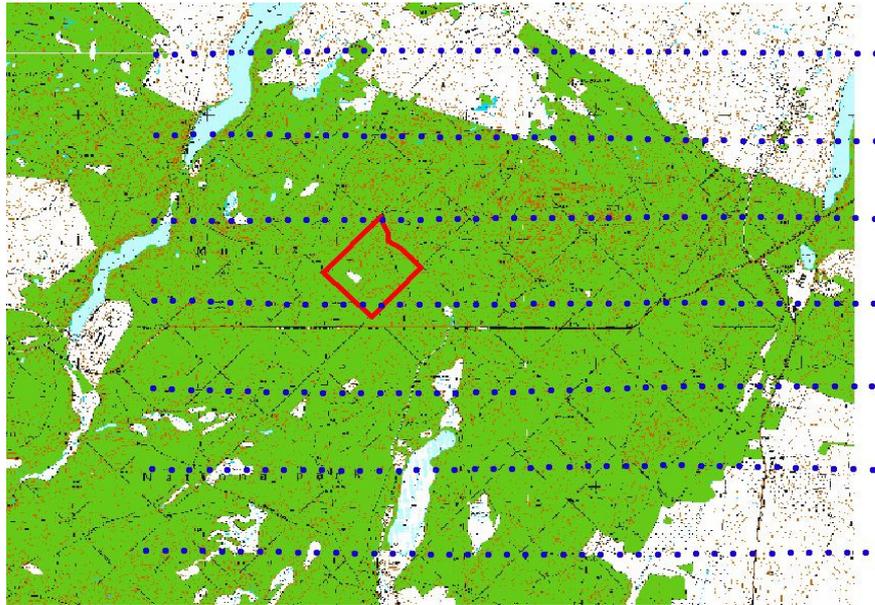


Abbildung 1 Lage der Flugstreifen in Bezug auf das Untersuchungsgebiet
Rot Untersuchungsgebiet
Blau Lage der Flugstreifen mit Bildmittelpunkten

Bei einer visuellen Qualitätskontrolle wurden 4 Fotos auf Grund von Aufnahme Fehlern der Digitalkamera verworfen. Die Fehler traten vorwiegend über offenen Seen auf, welche mehr als 60 % der Bildfläche einnahmen und so orientiert waren, dass eine direkte Reflexion von Sonnenstrahlen in den Strahlengang der Kamera erfolgte. Die „Blendung“ des Sensors führte zu einer Überbelichtung des Bildes. Dieser Aufnahme fehler war jeweils nur im aktuellen Foto erkennbar. Eine Verschleppung in das nächste Bild konnte nicht beobachtet werden.

Da der Überlappungsgrad der Fotos mit vertikal 80 % und horizontal 30 % sehr hoch ist, führten die genannten Aufnahme fehler zu keiner Verringerung der notwendigen Informationsdichte, zumal die fehlerhaften Fotos wie bereits dargestellt überwiegend offene Wasserflächen zeigen.

Eine radiometrische Korrektur der Bilddaten erfolgte nicht.

5.2. Digitale Datenerfassung

5.2.1. Grundlagen der digitalen Bilderfassung

In zunehmendem Maße kommen neben dem analogen Aufnahmemedium Film Halbleiter-Detektoren zur Erfassung von Luftbildern zum Einsatz. Für die Bewertung der digitalen Daten ist die Kenntnis der der Erfassung zugrunde liegenden physikalischen Ge-

setzmäßigkeiten erforderlich. Es soll daher an dieser Stelle auf grundlegende Unterschiede zwischen den beiden Aufnahmesystemen eingegangen werden.

Der prinzipielle Aufbau beider Aufnahmesysteme gleicht sich. Über ein optisches System von Linsen, Blenden und Filtern wird das aufzunehmende Objekt auf die im Strahlengang befindliche Aufnahmeebene projiziert. Die weitere Verarbeitung des analogen Eingangssignals unterscheidet sich jedoch wesentlich.

Bei der Filmkamera wird durch die vom aufzunehmenden Objekt reflektierten Photonen eine chemische Reaktion ausgelöst, die im Endeffekt zur Schwärzung des Films führt, wobei ein Bildelement (Silberoxidkristall) nur Schwarz oder Weiß sein kann (1bit). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Silberjodidkristall in Silberoxid umgewandelt wird, steht in direktem Verhältnis zur auftreffenden Energiemenge (Photonen) (Abbildung 2). Abweichungen ergeben sich, wenn wenige Photonen auf die Schicht treffen. Es entsteht ein Schleier als Grundhelligkeit. Die Solarisation stellt eine Aufhellung bei starker Überbelichtung dar.

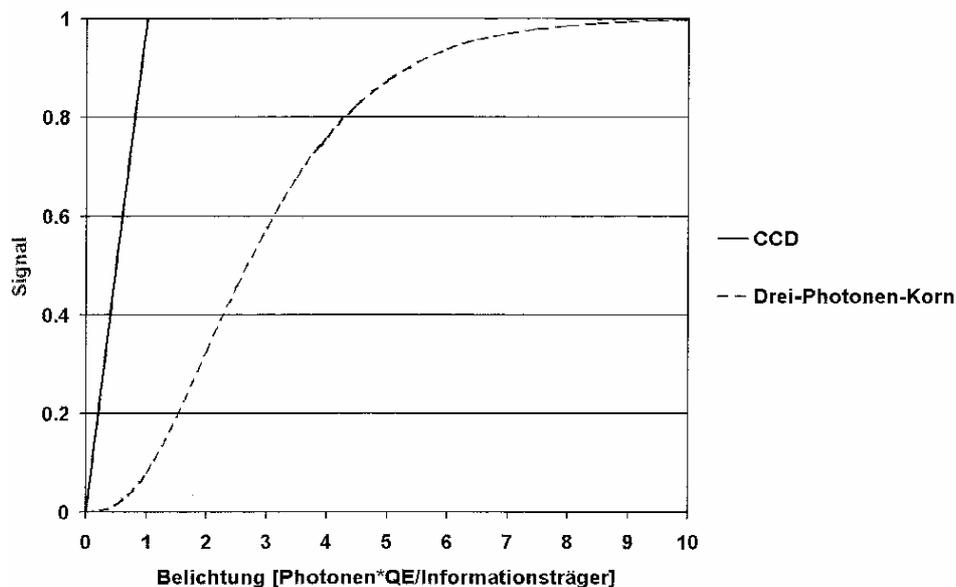


Abbildung 2 Signal in Abhängigkeit von der Belichtung für einen Film (Drei-Photonen-Korn) und einen CCD-Sensor (SANDAU; 2005)

Zum Verständnis der Abläufe innerhalb eines Halbleiter-Detektors wird der generelle Aufbau kurz erläutert.

Ein Halbleiter-Detektor besteht aus einer Halbleiterkristall (z.B. Germanium), welcher mit Atomen einer anderen Atomart (z.B. Lithium) dotiert ist. Durch den Einfluss von elektromagnetischer Strahlung / Photonen werden elektrische Ladungsträger freigesetzt (fotoelektrischer Effekt), deren Anzahl anschließend gezählt wird. Ein Halblei-

ter-Detektor-Bauelement besteht aus einer Vielzahl von rasterförmig angeordneten Einzeldetektoren. Je nach Bauform wird zwischen CCD und CMOS-Sensoren unterschieden, wobei der Unterschied zwischen beiden in dem Ort der Signalverarbeitung liegt. Bei einem CMOS-Sensor werden die herausgelösten Ladungsträger am Einzeldetektor, in einem CCD-Sensor die Ladungsträger aller zusammengefassten Einzeldetektoren dagegen zentral verarbeitet. Die Verarbeitung besteht in erster Linie im Zählen der pro Belichtungszeitraum / Auslesezeitraum herausgelösten Ladungsträger.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, verhält sich das Eingangssignal – Menge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung / Photonen – direkt proportional zur Anzahl der freigesetzten Ladungsträger. Im Gegensatz zum Film besteht diese Proportionalität über den gesamten Bereich.

Erfolgt die Belichtungssteuerung bei Filmmaterial über die Blende und den Verschluss, so wird dies in einer digitalen Aufnahmeeinheit auch über den Auslesezeitraum der Einzeldetektoren geregelt.

In einem folgenden Verarbeitungsschritt innerhalb der Kameraeinheit werden Algorithmen zur Rauschunterdrückung auf das Sensorsignal angewandt und das Signal abgespeichert.

Das Ansprechen digitaler Sensoren erfolgt durch elektromagnetische Strahlung / Photonen eines weiten Spektralbereiches. Daher liefern Halbleiter-Detektoren nur Aussagen zur Grauwertverteilung innerhalb eines relativ großen Spektrums. Eine Einschränkung des zu messenden Spektralbereichs erfolgt durch Vorschalten von entsprechenden Filtern, entweder innerhalb des Strahlengangs oder separat für jeden Einzeldetektor.

5.2.2. Digitale Luftbildkamera UltraCAM_D

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Luftbilder sind mit der digitalen Luftbildkamera UltraCAM_D aufgenommen worden, die von der österreichischen Firma Vexcel hergestellt und 2003 auf den Markt gebracht wurde.

Die UltraCAM_D zählt zur Gruppe der Matrixkameras, das heißt, das Belichten einer Luftbildszene erfolgt für die gesamte Szene zur gleichen Zeit. Im Gegensatz dazu wird bei Zeilenkameras das Bild zeilenweise aufgenommen.

Die panchromatische Bilderzeugung wird mit 9 CCD-Sensoren realisiert, die wie in Abbildung 3 dargestellt angeordnet sind. Die Objektivbrennweite beträgt 100 mm bei

einer Blende von 5,6. Mit einer physischen Größe der CCD-Sensoren von 24 x 36 mm ergibt sich bei 9 µm Pixelgröße ein digitales Bild von 4008 x 2672 Pixeln (ca. 10 MegaPixel). Aus den 9 Einzelbildern je Sensor wird softwaretechnisch ein digitales Bild mit einer Gesamtauflösung von 11 500 x 7 500 Pixeln erstellt. Diese weisen eine Bodenauflösung von 10 cm bei einer Flughöhe von 1.000 m auf.

Des weiteren stehen 4 CCD-Sensoren für die Farbkanäle (Tabelle 2) zur Verfügung (Objektiv 28 mm; Blende 5,6). Sie haben gegenüber dem erzeugten panchromatischen Bild eine 3-fach geringere Auflösung. Für die Erzeugung hochauflösender Farbbilder werden die Farbinformationen mit den Schwarz/Weiß-Daten zusammengeführt (fusio- niert). Das entstehende Farbbild weist die Bodenauflösung eines panchromatischen Bil- des auf.

Kanal	Spektralbereich (nm)
panchromatisch	390 – 690
Blue	390 – 530
Green	470 – 660
Red	570 – 690
NIR	670 – 940

Tabelle 2 Spektrale Auflösung der UltraCAM_D in den verschiedenen Kanälen

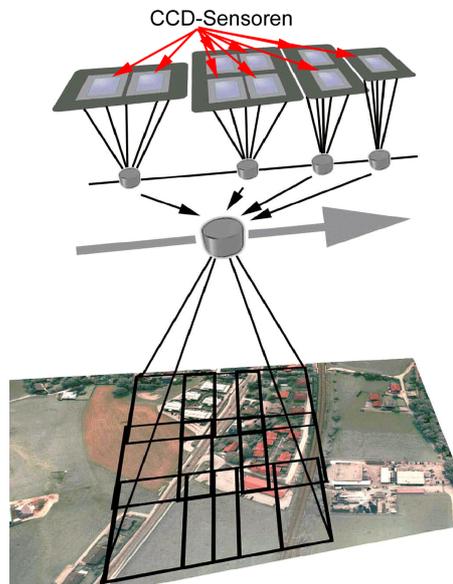


Abbildung 3 Anordnung der Einzelsensoren in der UltraCAM_D

Neben der hohen optischen Auflösung ermöglicht die radiometrische Auflösung von 12 bit sowohl radiometrische Korrekturen als auch eine detaillierte spektrale Weiterbe- arbeitung der Daten. Weiterhin ergibt sich ein gegenüber Filmmaterial deutlich größerer

Belichtungsspielraum, welcher bei Waldbefliegungen eine verbesserte Sichtbarkeit der abgeschatteten Bereiche von z.B. Kronen gewährleistet.

Bei einer Bildwiederholrate von bis zu 1,3 Bildern/sec wird eine Überlappung der Einzelbilder von 80 % in Flugrichtung und 30 % quer zur Flugrichtung erreicht. Damit ist eine hohe Verfügbarkeit von Stereopaaren gewährleistet.

5.3. Terrestrische Datenerfassung

Zur Überprüfung der aufgestellten Arbeitshypothese „Änderungen der Vitalität von Baumindividuen lassen sich in den digitalen Daten nachweisen“, mussten Kontrolldaten zur Kalibrierung der auszuwertenden Daten vorliegen.

Für diese Zwecke boten sich die jährlich durch das Landesamt für Forsten und Großschutzgebiete der Landesforstverwaltung Mecklenburg-Vorpommern erhobenen Inventur- / Vitalitätsdaten an.

Grundlage für die terrestrische Datenerhebung auf der Dauerbeobachtungsfläche „Göhrener Tannen“ ist der Bestimmungsschlüssel des Waldzustandsmonitorings (WZE).

Folgenden Daten werden bei der WZE erhoben:

- Nadel-/Blattverlust
- Vergilbung
- Kraftsche Klasse
- Fruktifikation
- Insektenbefall
- Pilzbefall
- Kronenbruch
- Sonstige abiotische Schäden

Von diesen Daten werden die Angaben zum Nadel- / Blattverlust (NBV) und zur Vergilbung (VG) für weitere Auswertungen herangezogen.

Diese Entscheidung beruht auf folgenden Überlegungen:

Die Erfassungsmerkmale *Kronenbruch* und *sonstige abiotische Schäden* sind Schäden, die abiotische Ursachen haben, wenn auch der Kronenbruch ein mögliches letztes Stadium einer biotischen Schädigung sein kann. Für die Merkmale *Insektenbefall* und *Pilzbefall* kann angenommen werden, dass sie zwar zu einer potentiellen Schädigung führen

können, sich jedoch zum Zeitpunkt der Erfassung nicht zwingend als Schädigung zeigen müssen.

Als Beispiel sei hier aufgeführt, dass ein Befall mit Prachtkäfern zwar als Fraß unter der Rinde am Stamm festgestellt werden kann, aber im ersten Jahr zu keinem Blattverlust oder zur Vergilbung führt und damit im Kronenbild nicht erkennbar ist. Das Merkmal *Kraftsiche Klasse* beschreibt die soziale Stellung des Baumes im Bestand. Lediglich die verbleibenden Merkmale *Nadel- / Blattverlust* und *Vergilbung* sind direkter Ausdruck des Kronenzustandes und somit im Luftbild erkennbar.

Die Erfassung von NBV und VG erfolgt durch terrestrische Ansprache in 5%-Stufen. Eine Kombination der beiden Merkmale ergibt die Schadstufe (AWD 1997, s. Tabelle 3). Auf der Grundlage dieser Schadstufe erfolgte die Auswertung innerhalb dieser Arbeit.

Blattverlust		Vergilbung				VG-Stufe %
NBV Stufe	NBV %	0 0-10 %	1 11-25 %	2 26-60 %	3 61-100 %	
0	0 - 10	0	0	1	2	Schadstufe
1	1 - 25	1	1	2	2	
2	26 - 60	2	2	3	3	
3	61 - 100	3	3	3	3	
4	100	4 = abgestorben				

Tabelle 3 Herleitung der Schadstufe aus den Klassen der Merkmale Nadel- / Blattverlust und Vergilbung

Seit 1998 wird auf der untersuchten Dauerbeobachtungsfläche vermehrt das Auftreten des Eichenwicklers (*Tortrix viridan*) beobachtet. Der Eichenwickler als blattfressendes Insekt kann an den Eichenbeständen zu folgenden Schadbildern führen, die zumeist in Kombination auftreten:

Primär

- Blattfraß bis hin zum Kahlfraß

Sekundär

- Ausfall der Mast,
- Schädigung des Unterbaus, wenn die Larven im Laufe ihre Entwicklung das Kronendach verlassen,
- Bildung von Wasserreisern,
- ungleichmäßige Jahrringbildung,
- Zuwachsverluste (um bis zu 30%),

In Verbindung mit den klimatischen Extremen der letzten Jahre (Hitzesommer 2003) führte dies zu einer massiven Schädigung des Eichenbestandes.

Der durch den Eichenwickler erfolgte Blattfraß wird bei der Vitalitätsansprache als NBV erfasst und dokumentiert.

5.3.1. Auswahl der Bäume zur Auswertung

Aus der Probengesamtheiten von 120 Bäumen wurden 39 Individuen ausgewählt. Grundlage für die Auswahl waren die im Rahmen der jährlichen Schadansprache ermittelten Werte für NBV und VG. Die angestrebte gleichmäßige Verteilung der Bäume in die einzelnen Schadklassen (siehe Tabelle 3) konnte nicht realisiert werden. Ein Grund dafür war die ungleichmäßige Schädigung der Bäume, ein weiterer war die nicht eindeutige Identifizierbarkeit aller Individuen auf den Luftbildern.

Die folgenden Bäume wurden für die Untersuchungen ausgewählt:

Lfd Nr	PK Nr	Baum Nr	NBV in %	NBV Klasse	VG in %	VG Klasse	Schadstufe				
							0	1	2	3	4
01	1	255	10	0	0	0	X				
02		288	35	2	5	0			X		
03		289	25	1	5	0		X			
04		294	45	2	25	1			X		
05	2	232	25	1	5	0		X			
06		249	30	2	5	0			X		
07		250	40	2	5	0			X		
08		251	40	2	5	0			X		
09	3	84	30	2	0	0			X		
10		326	35	2	10	0			X		

Identifikation von Vitalitätskennwerten mittels digitaler Luftbilddaten

Lfd Nr	PK Nr	Baum Nr	NBV in %	NBV Klasse	VG in %	VG Klasse	Schadstufe				
							0	1	2	3	4
11	4	95	25	1	0	0		X			
12		108	100	4	100	3					X
13		109	30	2	5	0			X		
14		110	30	2	0	0			X		
15	5	118	100	4	100	3					X
16		163	40	2	5	0			X		
17		164	30	2	0	0			X		
18	6	188	100	4	100	3					X
19		189	100	4	100	3					X
20		207	25	1	5	0		X			
21		209	30	2	0	0			X		
22	7	339	25	1	0	0		X			
23		340	85	3	65	3				X	
24		357	35	2	5	0			X		
25		360	80	3	75	3				X	
26	9	30	30	2	0	0			X		
27		35	40	2	0	0			X		
28		193	40	2	5	0			X		
29	10	3	30	2	5	0			X		
31		353	40	2	5	0		X			
32		382	40	2	0	0		X			
33	11	397	25	1	10	0		X			
34		402	25	1	0	0		X			
35		413	45	2	5	0			X		
36	12	460	45	2	35	2				X	
37		461	100	4	100	3					X
38		462	30	2	50	2				X	
39		487	40	2	5	0			X		
Summe							1	9	19	5	5
Anteilsprozent an Gesamtsumme							3	23	49	13	13

Tabelle 4 Im Rahmen der Arbeit ausgewertete Bäume mit Zuordnung zu Schadklassen

Insbesondere die Klasse der Bäume in der Schadstufe 0 – nicht geschädigt – ist mit nur einem Individuum sehr klein. Eine andere Datenauswahl war nicht durchführbar, da es innerhalb der Gesamtmenge der terrestrisch angesprochenen 120 Bäume nur einen ungeschädigten Baum gab.

Dagegen sind die Bäume in der Schadensklasse 2 deutlich überrepräsentiert.

5.4. Erstellung der Ortholuftbilder

Für die Auswertung der Kronenbilder bezüglich ihrer spektralen Eigenschaften ist die Verwendung von Ortholuftbildern nicht notwendig. Die radiometrischen Eigenschaften werden im Zuge der Orthobilderstellung nicht verändert, so dass die Arbeit theoretisch ohne die Entzerrung der Luftbilder hätte erfolgen können.

Die Verwendung der nicht entzerrten Bilder war sinnvoll, um Aussagen zu spektralen Unterschieden innerhalb der Kronen zu treffen. Da im Rahmen der Entzerrung der Luftbilder auch eine Drehung in der x-y-Ebene erfolgt, hätten sich Differenzen zwischen den einzelnen Kronenbildern in den verschiedenen Luftbildern ergeben.

Vor der Verwendung von Luftbildern müssen die Lagekoordinaten der einzelnen Bildpunkte aus dem Bildkoordinatensystem in das Landeskoordinatensystem überführt werden. Die Koordinatensysteme haben zum Zeitpunkt der Aufnahme keinen direkten Bezug zueinander. Die Bildkoordinaten weisen gegenüber den Landeskoordinaten eine Reihe von Verschiebungen auf, die im Rahmen der Aerotriangulation korrigiert werden. Die folgenden Aufnahmebedingungen führen u. a. zu diesen Differenzen:

- Verdrehung der Aufnahmeplattform in Ω -, φ - und κ -Richtung
 - äußere Orientierung
- Spezifischer Strahlenverlauf innerhalb der Kamera
 - innere Orientierung
 - Geländehöhen

Als Ausgangsdaten lagen 735 Luftbilder und luft sichtbare Passpunkte (LuPA's) vor. Das Untersuchungsgebiet „Göhrener Tannen“ wird von 14 Luftbildern abgedeckt.

Eine Triangulation ausschließlich mit diesen Luftbildern war nicht möglich, da für den Bereich nur eine sehr begrenzte Anzahl an LuPA's vorliegt und auch Referenzpunkte aus der topographischen Karte nicht vorhanden waren. Daher wurden die gesamten Bilder in einem Block trianguliert.

Zur Überführung der Bildkoordinaten in die Landeskoordinaten (Entzerrung) sind eine Reihe von mathematischen Ansätzen entwickelt worden, von denen der Bündelblockausgleich unter den gegebenen Bedingungen zum Ansatz kommt.

Die Bearbeitung der Luftbilder wurde mit der Software IMAGINE LPS, Version 8.7 durchgeführt.

Voraussetzung für die Anwendung des Bündelblockausgleiches ist eine Überlappung der Einzelbilder von mindesten 60% Längs- und 20% Querüberdeckung und das Vorliegen von in den Luftbildern erkennbaren Passpunkten.

Mittels Software erfolgt eine automatische Verknüpfung von sich überlappenden Bildern (Abbildung 4). Als Verknüpfungspunkte (homologe Punkte) dienen Strukturen innerhalb der Bilder, welche automatisch erkannt werden können. Es wird unterschieden zwischen Punkten, die nur Lagekoordinaten aufweisen, und solchen, die zusätzlich über Höheninformationen verfügen.

Mit den bekannten Parametern der inneren Orientierung der Kamera werden anschließend die Parameter der äußeren Orientierung errechnet.

Dabei werden die einzelnen homologen Punkte bzw. ihre Strahlengänge solange verschoben bis eine bestmögliche Annäherung der Strahlengänge gleicher Punkte erreicht wird. Dies erfordert sowohl eine Verschiebung der Aufnahmen in x-, y- und z-Richtung als auch deren Drehung um die drei Raumwinkel. Zusätzlich erfolgt die Anpassung der homologen Passpunkte mit den Geländekoordinaten.

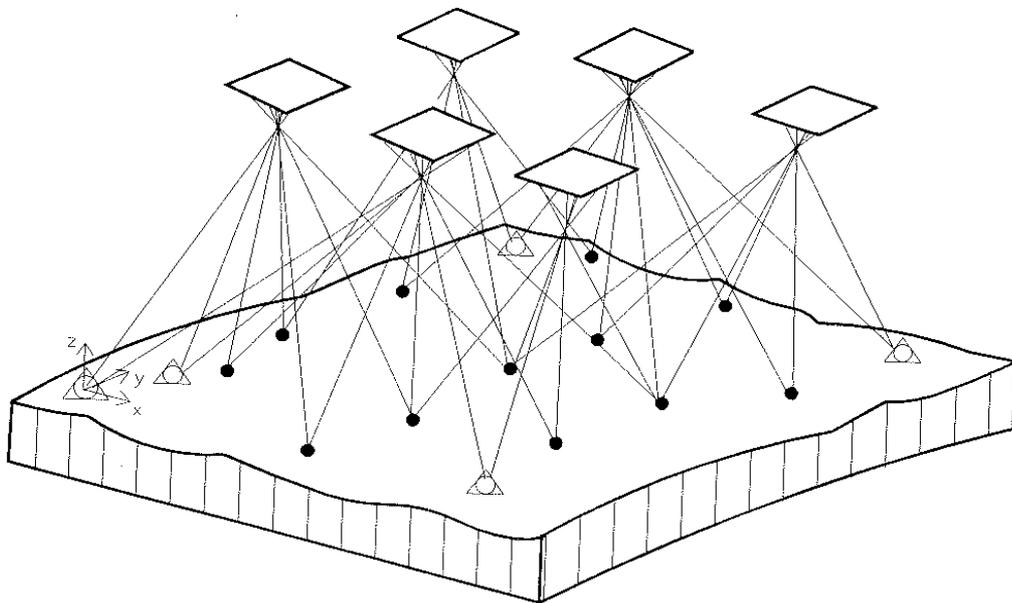


Abbildung 4 Grundprinzip des Bündelblockausgleichs mit homologen Punkten und deren Strahlengängen (KRAUS, 1997)

Mit den errechneten Parametern erfolgt eine Transformation der Pixel aus dem Bildkoordinatensystem in das Landeskoordinatensystem. In diesem Zusammenhang werden die pro Bildelement gespeicherten Grauwertinformationen resampelt. Angewandt wurde die Methode der kubischen Konvolution. Bei diesem Verfahren stellt der neue Grauwert

eine lineare Kombination der Grauwerte der nächsten 16 Zellen des Herkunftsrasters dar.

Nach der Erstellung der Einzelluftbilder wurden diese zu einem Gesamtbild zusammengefügt (mosaikiert). In die Untersuchung wurden sowohl die Einzelbilder als auch das mosaikierte Gesamtbild einbezogen.

5.5. Luftbilddauswertung

5.5.1. Digitalisierung der Kronenumrisse

5.5.1.1. Stereobildauswertung

Für eine eindeutiges optisches Identifizieren der Kronen im Luftbild erfolgte die Auswertung mittels des Stereotools der verwendeten Bildauswertungssoftware ERDAS Imagine 8.7 Stereo-Analyst.

Da Luftbilder mit einem Überdeckungsbereich von bis zu 80 % und einer Bodenaufklärung von 0,2 m zur Verfügung standen, wurde durchgehend eine sehr gute Qualität der Stereobilder erreicht.

Damit waren die technischen Möglichkeiten zum optischen Erkennen und Aushalten der Baumkronen gegeben.

Als Hilfsmittel zum Identifizieren der Kronen wurde ein unter ArcView erstelltes Shape der mittels DGPS vermessenen Kronen eingelesen, wobei hier den Punkten eine künstliche Höhe in m. ü. NN, zusätzlich geschätzter Baumhöhe, zugeführt wurde.

Trotz der gut erkennbaren Probenkreise war eine eindeutige Identifizierung der Kronen jedoch nur bedingt möglich. Die mittels DGPS-Vermessung festgestellten Lagepunkte der Bäume (Fußpunkte) stimmten mit den Baumkronen im Stereomodell häufig nicht überein. Verursacht wurde dies u. a. durch Ungenauigkeiten bei der GPS-Vermessung (Probleme mit der Signalabstrahlung innerhalb von Wäldern).

Bei einer durchschnittlichen Höhe des Eichenbestandes von 30 m lagen die Kronenmittelpunkte und die Baumfußpunkte visuell bis zu 5 m auseinander. In dem überwiegend geschlossenen Kronendach war ein eindeutiges Identifizieren der Kronen nicht immer möglich (Abbildung 5).

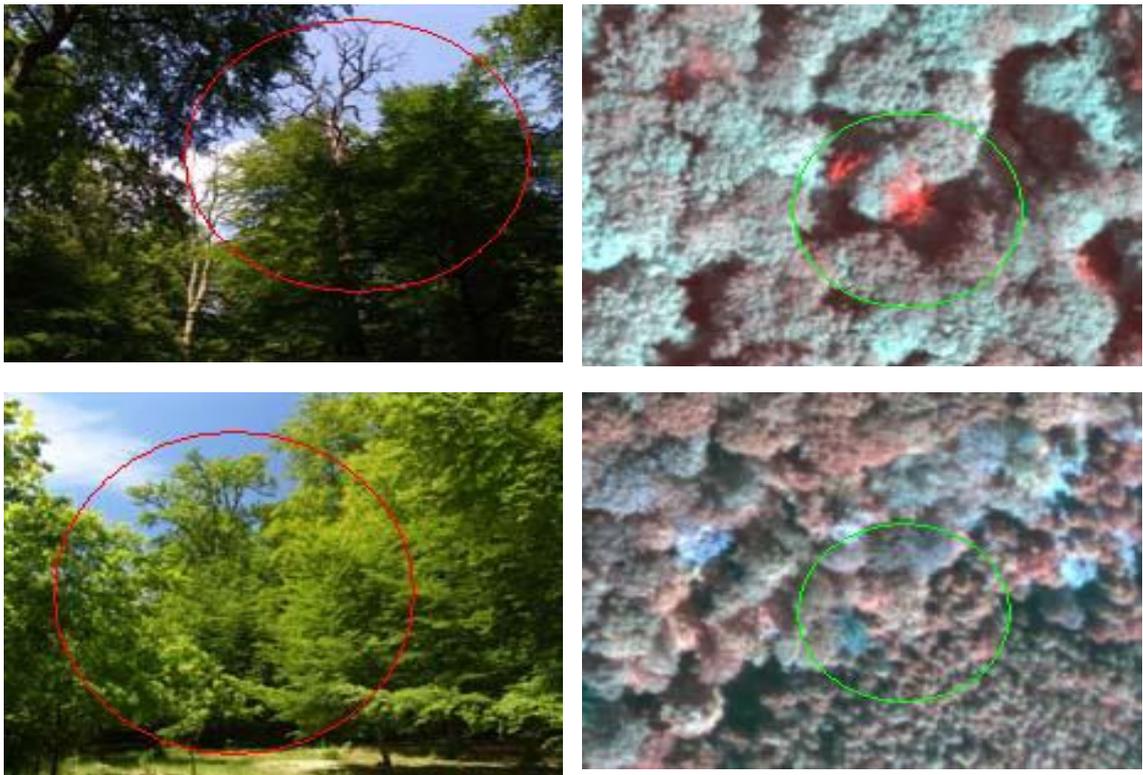


Abbildung 5 beispielhafte Fotos von Bäumen im Luftbild (rechts) und terrestrisch (links)
Baum 189 (oben, Totholz erscheint im IR rot); Baum 353 (unten)

Da eine absolute Übereinstimmung der terrestrisch erfassten Kronendaten mit den Luftbildern die Grundlage der Untersuchung war, musste eine Klärung Vor-Ort erfolgen. Die Geländebegehung erfolgte am 09.06.2005.

Die Kronen wurden nach Kontrolle in der Fläche auf den Luftbildern identifiziert und entsprechend vermerkt. Im Bereich des Probenkreises 8 konnte auf Grund der eingeschränkten terrestrischen Sichtbarkeit der Kronen kein eindeutiges Zuordnen erfolgen. Die hier erfolgte Vorauswahl der Bäume des Probenkreises 8 wurde verworfen.

Bei der Aufsuchung der Bäume im Gelände wurden alle Kronen fotografiert (beispielhaft Abbildung 5).

5.5.1.2. Kronenbezogene Erfassung der Grauwertverteilung

Für die weitere Bearbeitung musste für alle Pixel einer Krone die Grauwertverteilung ermittelt werden. Dies bedingt die im vorherigen Abschnitt beschriebene Identifikation und Abgrenzung der Einzelkronen.

In verschiedenen Arbeiten wird die automatische Kronendetektion beschrieben u. a. Wang et al. (2002). Die dort gewählten Ansätze eignen sich, mit der zur Verfügung stehenden Software, nicht für die Verarbeitung von Massendaten. Aus diesem Grund erfolgte die Kronendigitalisierung auf manuellem Wege. In einem späteren Arbeitsschritt ist geplant, die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse mit vollautomatisch gewonnenen Ergebnissen zu vergleichen. Das ist jedoch nicht mehr Gegenstand dieser Untersuchungen.

Die Erfassung der Pixelinformationen erfolgte mit der Software IMAGINE 8.7. Alle Einzelkronen wurden pro Luftbild einzeln als Area of Interest (AOI) digitalisiert.

In Übereinstimmung mit den stereoskopisch ermittelten Kronenformen wurden jeweils die erkennbaren Kronenumrisse digitalisiert. Die Differenzierung der Einzelkronen gestaltete sich auf Grund folgender Aspekte teilweise schwierig:

- Stark verändertes morphologisches Erscheinungsbild entsprechend dem Aufnahmewinkel,
- Hineinwachsen benachbarter Kronen.

Hieraus ergaben sich teilweise sehr unterschiedliche Kronenumrisse für ein und dieselbe Krone. Anfängliche Überlegungen, ein idealisiertes Kronenbild pro Baum zu definieren und dieses auf alle Kronen anzuwenden, wurden verworfen. Der Vorteil des idealisierten Kronenprofils ist, dass für jedes Kronenbild die gleiche Pixelmenge ausgewertet wird. Damit wird scheinbar die Vergleichbarkeit der Bilder der Einzelkronen erhöht. Gleichzeitig wird jedoch die hohe Informationsdichte, die sich aus der Gesamtheit der Pixel ergibt, erheblich beschnitten. Problematisch ist dies insbesondere, weil sich die Schädigung von Einzelkronen nicht auf die gesamte Fläche der Kronen beziehen muss. Bestimmte Schadbilder zeigen eine Auflichtung der Kronen im Zentralbereich bei gleichzeitiger Laubverdichtung in der Peripherie. Möglich ist auch das Absterben einzelner Äste, die sich dann als unregelmäßig verteilte „Löcher“ in der Krone zeigen. Im Falle der Anwendung eines idealisierten Kronenumrisses würden diese Einzelinformationen unter Umständen verloren gehen.

Nach der Definition der AOI wurden die Pixelinformationen in einem weiteren Arbeitsschritt in eine Datei (ASCII-Format) geschrieben. Es wurden die Grauwerte für die Kanäle Rot, Grün, Blau und NIR exportiert.

Für die spätere Auswertung der Grauwertverteilung innerhalb der Kronen, mussten diese in Quadranten eingeteilt werden. Anfängliche Überlegungen, diese Quadranten ein-

zeln zu digitalisieren, wurden zugunsten einer automatischen Extraktion aufgegeben (siehe Pkt. 5.6.1).

Die jetzt als ASCII-Daten vorliegenden Grauwerte wurden nachbearbeitet, da für die weitere Auswertung nötige Informationen wie Bild-Nr und Baum-Nr nicht automatisch in die ASCII-Datei aufgenommen werden können.

Die Nachbearbeitung erfolgte in einer erstellten Access-Applikation, mit der auch die weitere Verarbeitung der Daten vorgenommen wurde.

Die 39 in die Auswertung einbezogenen Bäume waren nicht immer alle in allen Luftbildern sichtbar (Tabelle 5). Durchschnittlich ist jede Krone auf 9 Bildern erkennbar. Insgesamt wurden 338 Kronenumrisse als AOI's erfasst.

B-Nr Baum	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Ge- samt*
Probenkreis 1															
255			x	x	x					x	x	x	x		x
288				x	x				x	x	x	x	x		x
289			x	x	x				x	x	x	x	x		x
294			x	x	x				x	x	x	x	x		x
Probenkreis 2															
232			x	x	x					x	x	x	x	x	x
249										x	x	x	x		x
250			x	x	x					x	x	x	x		x
251			x	x	x					x	x	x	x		x
Probenkreis 3															
84		x	x	x	x				x	x	x	x			x
326		x	x	x	x			x	x	x	x	x			x
Probenkreis 4															
95			x	x	x	x			x	x	x	x	x		x
108			x	x	x	x			x	x	x	x	x		x
109			x	x	x	x			x	x	x	x	x		X
110			x	x	x	x			x	x	x	x	x		x
Probenkreis 5															
118			x	x	x	x				x	x	x	x		x
163			x	x	x	x				x	x	x	x		x
164			x	x	x	x				x	x	x	x		x
Probenkreis 6															
188			x	x	x	x	x				x	x	x	x	x
189			x	x	x	x	x				x	x	x	x	x
207			x	x	x	x	x				x	x	x	x	x
209				x	x	x	x				x	x	x	x	x

B-Nr Baum	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Ge- samt*
Probenkreis 7															
339	x	x	x	x				x	x	x	x				x
340	x	x	x	x				x	x	x	x				x
357	x	x	x	x				x	x	x	x				x
360	x	x	x	x				x	x	x	x				x
Probenkreis 9															
30			x	x	x	x				x	x	x	x		x
35			x	x	x	x				x	x	x	x		x
193			x	x	x	x				x	x	x	x		x
Probenkreis 10															
3				x	x	x	x				x	x	x	x	x
9			x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
353			x	x	x	x	x				x	x	x	x	x
382				x	x	x	x				x	x	x	x	x
Probenkreis 11															
397			x	x	x	x				x	x	x	x		x
402			x	x	x	x				x	x	x	x		x
413			x	x	x	x						x	x		x
Probenkreis 12															
460			x	x	x	x									x
461			x	x	x	x									x
462			x	x	x	x									x
487			x	x	x	x									x
Summe	4	6	34	38	34	25	8	5	13	27	34	31	29	9	39

Tabelle 5 Angaben zur Sichtbarkeit der Einzelbäume in den verschiedenen Luftbildern

* - mosaikiertes Gesamtbild

5.6. Statistische Untersuchungen

5.6.1. Datenzusammenstellung / -aggregation mittels DBMS

Für die spätere Aggregation der Daten zur Auswertung im Statistikprogramm SPSS wurden die als ASCII-Datei abgespeicherten Grauwertinformationen in eine Access Datenbank eingelesen.

Insgesamt wurden ca. 1.2 Mio Datensätze in der Access-Anwendung erfasst und weiter bearbeitet. Die Speicherung erfolgte in einer flachen Tabellenstruktur. Die redundante Haltung von Daten wie der Bild-Nr. und der Baum-Nr. wurde im Interesse eines einfachen Datenhandlings in Kauf genommen.

Da im Rahmen der Bearbeitung Aussagen zur Grauwertverteilung innerhalb der Kronen erfolgen sollten, musste eine Möglichkeit gefunden werden, die erfassten Pixel pro Krone entsprechend ihrer Lage in der Krone zu extrahieren.

Eine manuelle Extraktion im Rahmen der Datenerfassung wurde auf Grund des großen Aufwandes und der hohen Fehleranfälligkeit verworfen. Stattdessen erfolgte die Extraktion innerhalb des DBMS Access.

Jede Krone wurde virtuell in Quadranten eingeteilt, wobei die Achsen N-S bzw. E-W gerichtet waren. Denkbar wäre auch die Ausrichtung einer Achse in Richtung der Sonne als Beleuchtungsquelle gewesen. Von Vorteil bei dieser Ausrichtung der Quadranten ist, dass immer die gleichen Quadranten die Schattenbereiche bzw. beschienenen Bereiche darstellen. Eine diesbezügliche Automatisierung der Pixelauswahl ist mit Access jedoch nicht möglich.

Nach Bestimmung der Kronenmittelpunkte aus der Gesamtheit der XY-Koordinaten pro Kronenumriss, wurden Abfragen über die Lage der Pixel in den jeweiligen Quadranten erstellt. Auf der Grundlage dieser Abfragen erfolgte eine Aktualisierung der Daten pro Pixel um ein Lageattribut. Die Attribute wurden wie folgt vergeben:

- Lageattribut 1 → NW-Quadrant
- Lageattribut 2 → NE-Quadrant
- Lageattribut 3 → SE-Quadrant
- Lageattribut 4 → SW-Quadrant

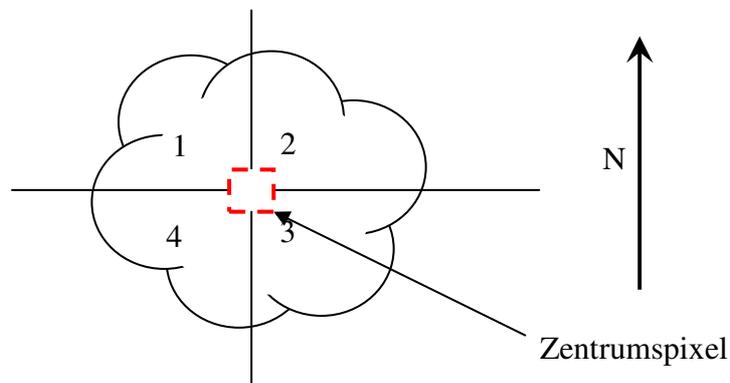


Abbildung 6 Lage der Quadranten innerhalb einer Krone

Neben der Extraktion der Gesamtmenge aller Pixel pro Krone, wurde eine Teilmenge (Zentrumspixel) der Krone markiert und ausgelesen.

Mittels eines vorherigen t-Tests wurde festgestellt, dass bei einer Grundgesamtheit von ca. 3.400 Pixeln pro Krone mit 80 Pixeln (hier Zentrumspixel) statistisch gesicherte Aussagen (80% Sicherheit) getroffen werden können.

Daher wurde ausgehend vom oben bestimmten Kronenmittelpunkt ein quadratischer Bereich von 9 x 9 Pixeln ausgehalten. Die entsprechende Abfrage markierte alle Pixel

jeweils $\pm 0,4$ m in x- und y-Richtung. Bei der vorliegenden Auflösung der Bilder von 0,2 m/Pixel, entspricht diese Abfrage genau 81 Pixeln.

Die so extrahierten Pixel werden im Folgenden als Zentrumpixel bezeichnet.

Neben den Pixelextraktionen wurden für jedes Pixel verschiedene Vegetationsindexe berechnet.

Dabei wurden verwendet:

- RVI Ratio-Vegetationsindex $\frac{(NIR)}{(ROT)}$
- NDVI Normalisierter Differenz-Vegetationsindex $\frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT)}$
- TNDVI Transformed Normalized Vegetation Index $\sqrt{\frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT)}}$
- DD Differenz-Differenz Vegetationsindex
 $(2 * NIR - ROT) - (GRÜN - BLAU)$
- VI_{DIFF} Differenzkanal GRÜN – Rot $(GRÜN - ROT)$

Grundlage für die verschiedenen Indizes sind die Unterschiede im Rückstrahlungsvermögen von Vegetation, Ästen und Boden. So zeigen sich Unterschiede innerhalb der Vegetation besonders prägnant im Bereich des nahen Infrarot (NIR). Gleiches gilt mit Abstufungen für den ROT-Kanal. Im Gegensatz dazu erfolgt die Rückstrahlung im GRÜN / BLAU Kanal hauptsächlich durch Äste und Boden (Abbildung 8).

Die Berechnung der Indizes erfolgte, um zu testen, ob über diese Werte eine Unterscheidung des Grades der Schädigung in Abhängigkeit von den spektralen Eigenschaften der Baumkronen möglich ist.

5.6.2. Auswertung mittels Statistiksoftware SPSS

Die statistische Betrachtung der Gesamtverteilung aller Grauwerte der Kanäle Rot, Grün, Blau und NIR der selektierten Kronen wurde mit der Statistik-Software SPSS, Version 11.5 durchgeführt.

Es wurden für die statistische Auswertung verschiedene Betrachtungen angestellt:

- Grauwertverteilung der Pixelinformationen aller selektierten Kronen in Abhängigkeit von der Schadstufe

- Grauwertverteilung innerhalb der Quadranten der Kronen
- Grauwertverteilung für Einzelkronen in den verschiedenen ausgewerteten Einzelluftbildern
- Grauwertverteilung in Abhängigkeit von den Schadstufen in einem mosaikierten Gesamtbild
- Grauwertverteilung der Zentrumspixel in Abhängigkeit von den Schadstufen für die Einzelbilder
- Grauwertverteilung der Zentrumspixel in Abhängigkeit von den Schadstufen für das mosaikierte Gesamtbild

5.6.2.1. Grauwertverteilung in Abhängigkeit von der Schadstufe für Einzelkronen

In einem ersten Schritt sollte untersucht werden, für welche statistischen Kenngrößen von Grauwertverteilungen der Einzelkronen Beziehungen zu den Schadstufen nachweisbar sind. Diese grundlegende Betrachtung diente der Auswahl der optimalen statistischen Kenngrößen und Spektralkanäle die in die weiteren Untersuchungen eingehen. Dazu wurde eine Analyse der Grauwertverteilungen aller Einzelkronen in allen Ortholuftbildern durchgeführt. Die gewonnenen Daten wurden zu den bekannten Schadstufen der Einzelbäume ins Verhältnis gesetzt.

Die folgenden statistischen Kenngrößen wurden für alle Einzelindividuen berechnet:

- Anzahl der Pixel pro Krone
- Spannweite
- Arithmetisches Mittel
- Median
- Standardabweichung

Die Berechnung erfolgte sowohl für die Einzelkanäle (Anlage 1) als auch für die Vegetationsindizes (Anlage 2). Um später belastbare Aussagen für das mosaikierte Gesamtbild treffen zu können, wurden die Berechnungen hierfür ebenfalls ausgeführt (Anlage 3 und 4).

Anfangs wurde postuliert, dass Aussagen, die für die Gesamtmenge der Pixel einer Krone gelten, auch auf Teilmengen dieser Krone angewendet werden können. Unter diesem Hintergrund wurden die für die Gesamtheit der Kronenpixel in den Einzelbil-

dem und dem mosaikierten Gesamtbild berechneten Werte auch für Teilmengen der Pixel (Zentrumspixel) berechnet (Anlagen 5 bis 8).

Bei der Betrachtung der verschiedenen Ausgangsdaten fiel auf, dass insbesondere der NIR-Kanal eine große Spannweite aufweist. Dies ist gleichbedeutend mit einer hohen Differenzierung des Signals in diesem Bereich, welche charakteristisch für eine hohe Informationsdichte ist.

Der Spektralbereich des Nahen Infrarot (NIR) wird besonders zur Auswertung der Vegetation genutzt und spiegelt den Wassergehalt innerhalb von Blättern / Nadeln wieder. In Verbindung mit dem roten Spektrum (ROT) wird der Ratio-Vegetationsindex RVI berechnet, welcher eine starke Differenzierung der Vegetation erlaubt. Der Ratio-Vegetationsindex RVI korrelierte in allen untersuchten Fällen direkt mit den Schadstufen.

Aus den genannten Gründen wurden alle weiteren Untersuchungen mit dem Ratio-Vegetationsindex RVI und dem NIR-Kanal vorgenommen.

5.6.2.2. Grauwertverteilung innerhalb der Quadranten der Einzelkronen

Für die Klärung einer eventuellen Abhängigkeit der Grauwertverteilung von der Lage zur Beleuchtungsquelle bzw. dem Blickwinkel wurde aus den verschiedenen Schadstufen jeweils ein Baumindividuum ausgewählt. Zur Auswahl kamen die Bäume, welche auf Grund ihrer Werte für den NBV und VG als charakteristisch für die jeweilige Stufe eingeschätzt werden konnten. Berücksichtigung fanden dabei auch die Histogramme um visuell die Verteilungen der Grauwerte einzuschätzen.

Von den selektierten Bäumen wurden dann die Grauwertverteilungen innerhalb der verschiedenen Quadranten und für jedes Luftbild auf dem die Krone sichtbar war, zur weiteren Bearbeitung in das DBMS übernommen. Die Bearbeitung erfolgte auch für das mosaikierte Gesamtbild. In einem früheren Schritt war die Einteilung der Kronen in die Quadranten mittels des DBMS Access erfolgt. Das dort vergebene Lageattribut wurde hier als Selektionskriterium verwendet.

Von den so gruppierten Grauwertverteilungen, wurde dann der Median für die Grauwerte des NIR und den Ratio-Vegetationsindex berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Anlage 9 zusammengefasst.

5.6.2.3. Grauwertverteilung für Einzelkronen in den verschiedenen ausgewerteten Einzelluftbildern

In einem nächsten Schritt erfolgte die Berechnung der Daten zur Überprüfung der Abhängigkeiten zwischen dem Median der Grauwertverteilung (NIR und RVI) und der Schadstufe. Hierzu wurden die Daten innerhalb von SPSS nach Luftbildern und Schadstufen gruppiert. Für die so entstandenen Gruppen wurde der Median für die Grauwerte des NIR und den Ratio-Vegetationsindex bestimmt.

Die Berechnungen erfolgten jeweils für die Einzelbilder, das mosaikierte Gesamtbild, die Zentrumspixel der Einzelbilder und die Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes. Die Berechnungsergebnisse sind in der Anlage 10 und Anlage 13 zusammengefasst.

6. Ergebnisse

6.1. Grauwertverteilung innerhalb der Gesamtkronen

6.1.1. Einzelbilder

Ziel der Analysen war es, Abhängigkeiten zwischen der Schadstufe und den spektralen Eigenschaften von Eichen zu untersuchen.

Dies erfolgte durch die Auswertung der Grauwertverteilung der Kronen für die Kanäle Rot, Grün, Blau und NIR. Neben der Berechnung von Vegetationsindizes für jeden Pixel der Krone, wurden statistische Analysen für die Gesamtheit der Pixel und Teilmengen einer Krone durchgeführt.

In einem ersten Berechnungsschritt wurde die Gesamtheit aller erhobenen Pixel in Abhängigkeit von der jeweiligen Schadstufe der Kronen betrachtet.

Die Untersuchungsergebnisse sind für die vier Kanäle in der Anlage 1 und für die berechneten Vegetationsindizes in der Anlage 2 zusammengefasst.

Diese Werte wurden nur aus den Einzelbildern berechnet. Die Grauwertinformationen aus dem mosaikierten Gesamtbild werden in einem späteren Abschnitt betrachtet.

Bei der Analyse der verschiedenen statistischen Kenngrößen kann besonders für den Median der Grauwertverteilung der verschiedenen Kenngrößen eine Abhängigkeit von der Schadstufe festgestellt werden. Die Untersuchung anderer statistischer Kenngrößen, wie der Spannweite, der Standardabweichung und dem Mittelwert brachten keine eindeutigen Ergebnisse.

Der Median einer geordneten Stichprobe teilt diese in zwei gleiche große Teilmengen aufteilt. Er eignet sich sehr gut Charakterisierung von Verteilungen, die eine sehr große Asymmetrie aufweisen. In der Abbildung 7 sind typische Histogramme der Grauwertverteilungen für die einzelnen Schadstufen dargestellt (verwendete Bäume siehe Anlage 9).

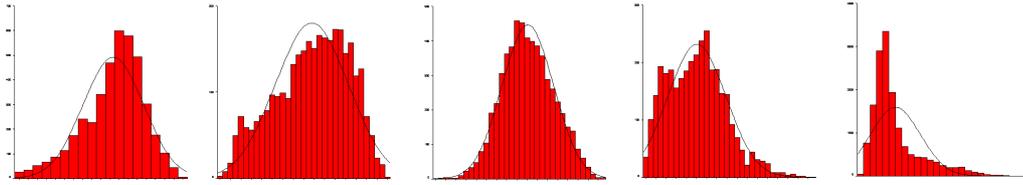


Abbildung 7 Histogramm des NIR – links mit Schadstufe 0 beginnend bis Schadstufe 4 (Einzelbilder)

Die Grauwertverteilung verschiebt sich in Abhängigkeit von der Schadstufe von einer rechtsgipfligen Verteilung (Schadstufe 0) zu einer linksgipfligen Verteilung (Schadstufe 4). Charakteristisch für ungleichmäßige Verteilungen ist, dass der Mittelwert und der Median nicht identisch sind.

Es gilt:

- rechtsgipflige Verteilung Mittelwert < Median
- linksgipflige Verteilung Median < Mittelwert

Bei der vorliegenden Verteilung war die Verwendung des Medians zur Beschreibung der Verteilung angezeigt.

In Abbildung 8 ist das Reflexionsverhalten von grünen Blättern (Chlorophyll), Ästen und Boden in Beziehung zur reflektierten Wellenlänge dargestellt.

Aus den in Tabelle 2 aufgeführten spektralen Auflösungen der 4 Kanäle Rot, Grün, Blau und NIR lässt sich auf die Eignung der verschiedenen Kanäle für die Unterscheidung zwischen geschädigten und ungeschädigten Blättern sowie Ästen schließen.

Das nahe Infrarot (NIR) wird besonders stark von Blättern reflektiert (30-35%; BUSCHMANN et. al. 1998). Es bestehen Unterschiede zwischen dem Reflexionsverhalten von gesunden und gestressten Blättern. Gesunde Blätter reflektieren besser als gestresste, ungesunde Blätter. Die Differenz im Reflexionsgrad beträgt ca. 5% (BUSCHMANN et. al. 1998).

Im blauen, grünen und roten Spektrum reflektieren die Blätter nur gering, dagegen Äste und Böden höher (Abbildung 8). Bei einer Schädigung von Baumkronen ist davon auszugehen, dass der Anteil des NIR bei gleichzeitiger Zunahme des Rot-Anteils abnimmt. Anlage 1 und Anlage 2 zeigen dies für den Median der Grauwertverteilung. In der Abbildung 9 ist diese Abhängigkeit graphisch dargestellt.

Die Schadstufe und der Median der Grauwertverteilung im NIR-Kanal verhalten sich indirekt proportional zueinander. Bedingt durch die große Spannweite der Grauwertverteilung innerhalb des NIR-Kanals, ist die Differenzierung des Signals in Beziehung zur Schadstufe deutlich erkennbar. Auf Grund dieser Eigenschaften eignen sich besonders der rote und der NIR Kanal zur Berechnung von Vegetationsindizes.

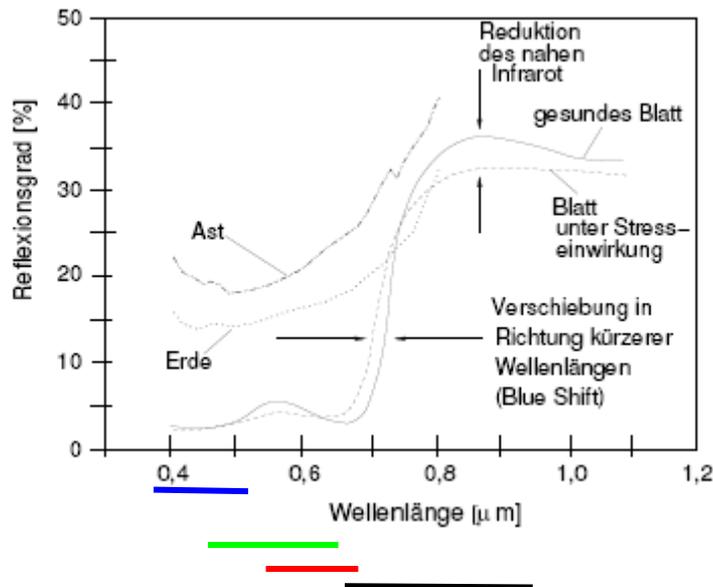


Abbildung 8 Reflexionseigenschaften von Blättern, Ästen und Boden mit Lage der 4 Spektralbereiche der UltraCAM_D

Zur Veranschaulichung der Beziehungen zwischen den Schadstufen und dem Median der Grauwertverteilung wurden diese in Diagrammen dargestellt. Für die Graphen des NIR und RVI erfolgte die Berechnung des linearen Trends mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes.

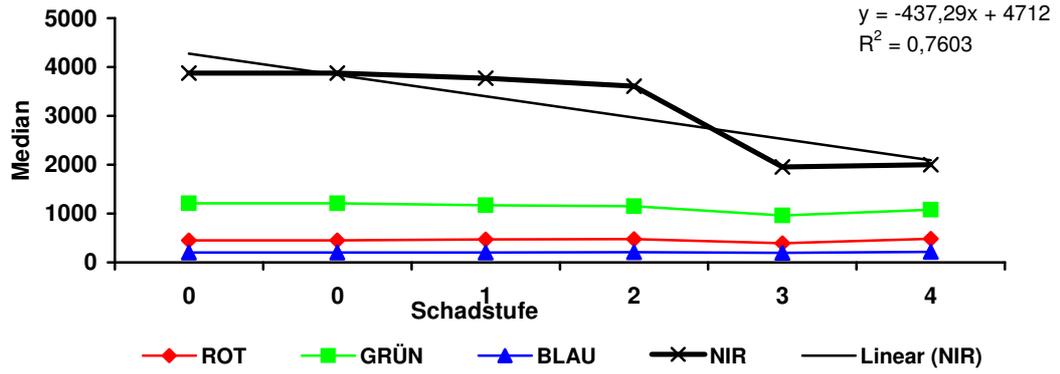


Abbildung 9 Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Kanäle ROT, GRÜN, BLAU und NIR (mit linearem Trend NIR), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder

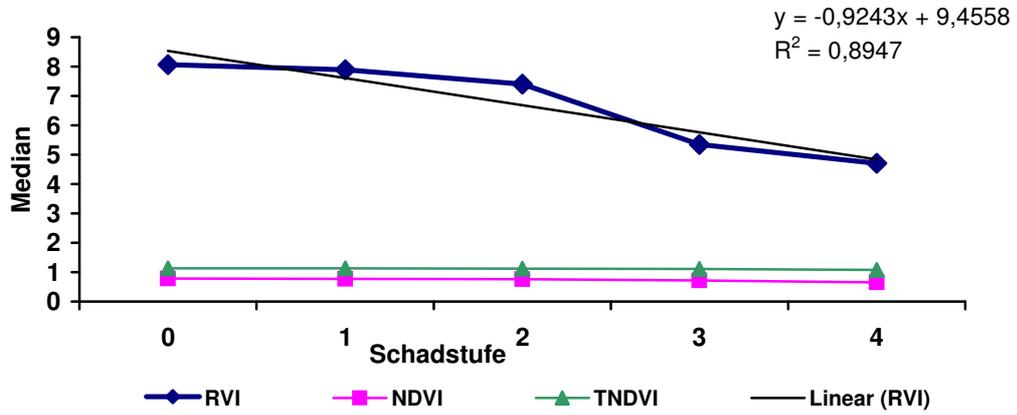


Abbildung 10 Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Vegetationsindizes RVI (mit linearerem Trend), NDVI und TNDVI, alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder

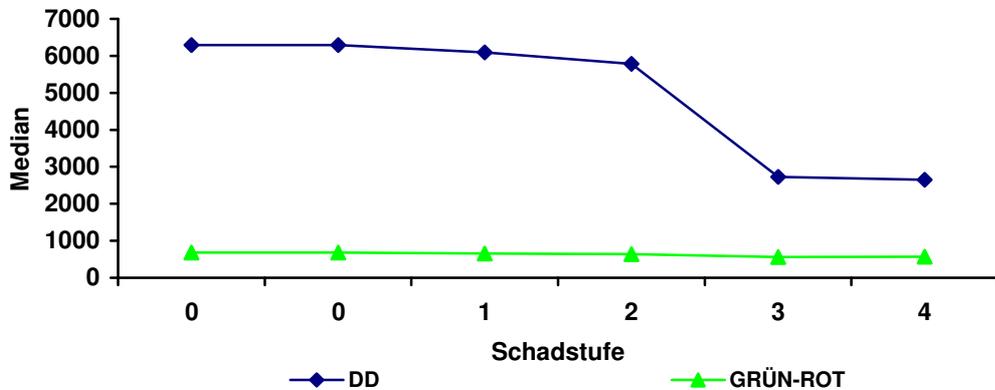


Abbildung 11 Gegenüberstellung des Medians und der Schadstufe für die Vegetationsindizes DD und GRÜN-ROT, alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder

Die deutlichsten Beziehungen zwischen Schadstufe und Grauwertverteilung sind für den NIR-Kanal (Abbildung 9), den Ratio-Vegetationsindex (Abbildung 10) und den DD (Abbildung 11) erkennbar. Der Graph des Ratio-Vegetationsindex zeigt dabei den differenziertesten Verlauf und eignet sich daher am besten für die weiteren Untersuchungen. Dies wird auch durch die Betrachtung des linearen Trends und dessen Bestimmtheitsmaß unterstützt.

Als charakteristischster Einzelkanal – große Spannweite der Einzelwerte - wird auch der NIR-Kanal in die weitere Betrachtung mit einbezogen.

6.1.2. Mosaikiertes Gesamtbild

In Kapitel 6.1.1 wurde die Beziehung zwischen dem Median der Grauwertverteilung des NIR, RVI und der Schadstufe unter Verwendung der Gesamtheit aller Einzelbilder untersucht. Diese Analysen werden in einem weiteren Arbeitsschritt auch für das mosaikierte Gesamtbild durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der Anlage 10 und Anlage 11 zusammengefasst.

Das mosaikierte Gesamtbild ist durch Funktionsübertrag der Einzelbilder unter Verwendung mathematischer Ausgleichsverfahren zur radiometrischen Korrektur der Bildelemente entstanden. Es wurde daher auch untersucht ob dies zu einer Veränderung der Grauwertverteilung geführt hat. Dazu wurden die Histogramme für je einen Baum je Schadstufe (gleiche Bäume wie in Kapitel 6.1.1) ermittelt.

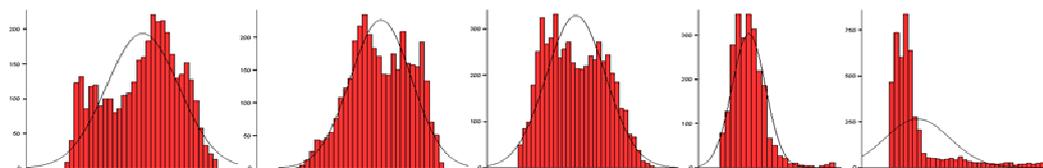


Abbildung 12 Histogramme (NIR) – links mit Schadstufe 0 beginnend bis Schadstufe 4 (mosaikiertes Gesamtbild)

Die in Abbildung 12 dargestellten Histogramme der Grauwertverteilungen weisen die schon bekannte Asymmetrie mit rechts- bzw. linksgipfliger Verteilung auf. Beim Vergleich mit den Histogrammen und den beschreibenden statistischen Kenngrößen aus den Einzelbildern fällt auf, dass die Verteilungen durchweg eine größere Standardabweichung und damit Streuung der Werte haben.

Beispielsweise zeigt das Histogramm der Schadstufe 0 linksseitig eine deutliche Schulter, welche auf entlaubte Bereiche oder starke Bodenreflexionen hindeutet.

Bei der visuellen Betrachtung des Bildes in IMAGINE bestätigt sich diese Vermutung.

Während bei den Einzelbildern durch die größere Datenmenge zu einer Nivellierung von Ausreißern führt, stellt dies bei dem mosaikierten Gesamtbild ein Problem dar.

In Abbildung 13 und Abbildung 14 wurden das NIR und der RVI den Schadstufen gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass sich die bereits für die Summe der Einzelbilder festgestellte Beziehung zwischen dem Median der Grauwertverteilung und der Schadstufe auch in dem mosaikierten Gesamtbild widerspiegelt.

Der Graph des NIR zeigt im Bereich der Schadstufe 3 - 4 einen etwas anderen Verlauf. In der Summe der Einzelbilder sind die Werte für die Schadstufe 3 und 4 (Abbildung 9) fast identisch, in dem mosaikierten Gesamtbild zeigt sich hier ein deutlicher Abfall der Werte. Der lineare Trend weist für beide Graphen ein hohes Maß an Bestimmtheit R^2 auf.

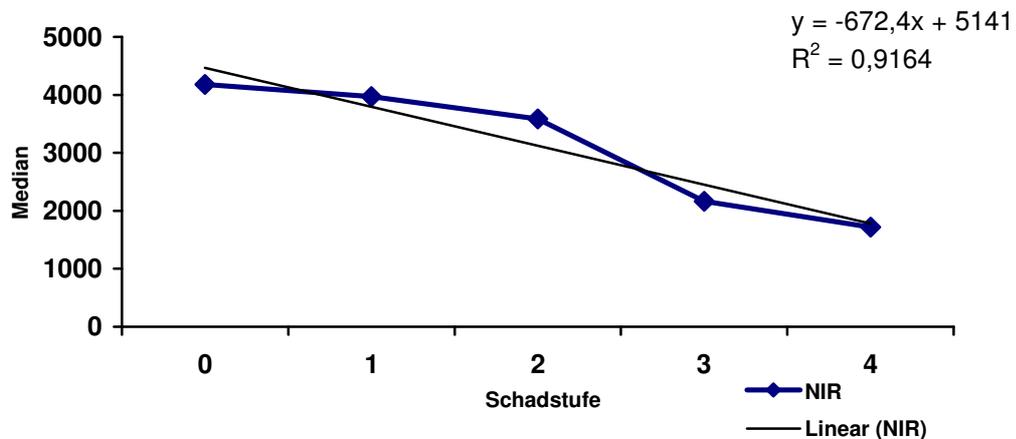


Abbildung 13 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den NIR-Kanal (mit linearem Trend), alle Angaben für mosaikiertes Gesamtbild

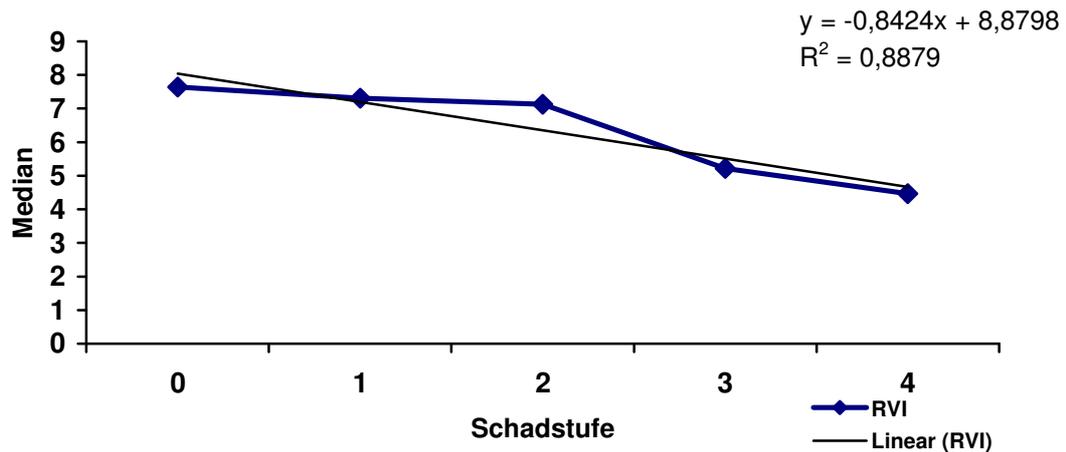


Abbildung 14 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für mosaikiertes Gesamtbild

6.2. Grauwertverteilung innerhalb der Zentrumspixel

Nach dem gezeigt werden konnte, dass über den Median eine Beziehung zwischen der Schadstufe und der Grauwertverteilung in den Einzelbildern als auch dem mosaikierten Gesamtbild besteht, soll in diesem Schritt untersucht werden ob diese Abhängigkeit auch für Teilmengen von Pixeln der Kronen gilt.

Hintergrund dieser Fragestellung ist das gegenwärtig bestehende Problem der automatischen Kronenerkennung. Die bisher verwendeten Algorithmen erlauben mit der im Landesamt für Forsten und Großschutzgebieten bereitstehenden Software keine Massendatenverarbeitung. Daher wird ein anderer Lösungsweg untersucht.

Ausgehend von der Tatsache, dass jede Krone mit ihrem höchsten Punkt ein lokales Höhenmaximum darstellt, wird versucht diese Maxima automatisch zuerkennen. In einem weiteren Schritt werden dann die Grauwertinformationen in einem definierten Bereich um dieses Maximum (Zentrumspixel) ausgelesen und zur Bestimmung der Schadstufe herangezogen.

Auf eine Betrachtung der Histogramme wie für die Grauwerte der Gesamtkronen wird verzichtet, da die geringe Anzahl der ausgewerteten Pixel, 81 pro Krone, keine sinnvolle visuelle Auswertung ermöglicht. Die prinzipielle Abhängigkeit zwischen Schadstufe und Median der Grauwertverteilung ist bereits hinreichend beschrieben worden.

Die Extraktion dieser Zentrumspixel erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mittels Datenbankabfragen (Kapitel 5.6.1).

6.2.1. Einzelbilder

In der Anlage 5 und Anlage 6 sind die Grauwertverteilungen für die verschiedenen Kanäle und Vegetationsindizes zusammengefasst. Diese Angaben beziehen sich auf die aus allen Einzelbildern bestimmten statistischen Kenngrößen für die Zentrumspixel.

Zur Illustration der Abhängigkeit wurde der resultierende Graph aus Schadstufe und Median dargestellt und der lineare Trend mit Bestimmtheitsmaß angegeben.

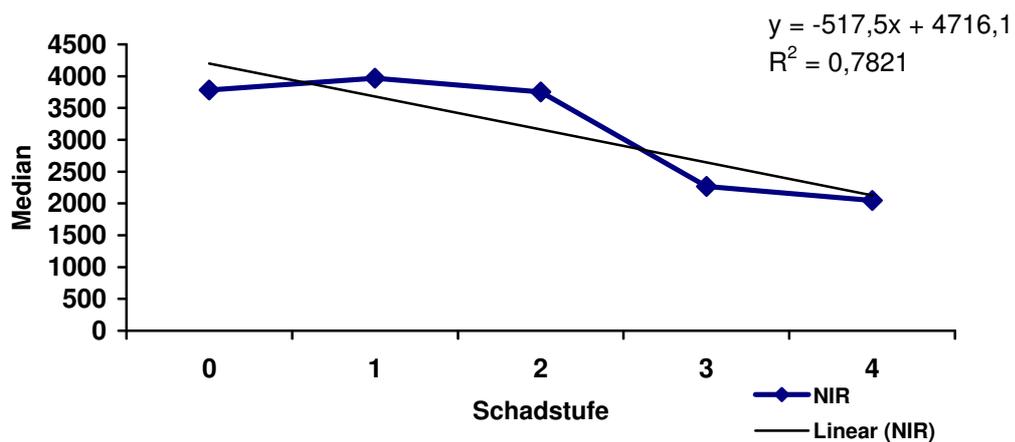


Abbildung 15 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für das NIR (mit linearem Trend), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder-Zentrumspixel

Für das NIR ist der Verlauf des Graphen im Bereich der Schadstufen 0 – 1 nicht eindeutig. Der sichtbare Anstieg der Werte kann nicht genau erklärt werden. In jedem Fall muss beachtet werden, dass die Grauwertinformationen für die Schadstufe 0 auf nur einer Krone basieren (siehe 5.3.1) und daher sehr kritisch zu hinterfragen sind.

Der weitere Verlauf des Graphen entspricht sowohl dem für das mosaikierte Gesamtbild als auch dem für die Einzelbilder.

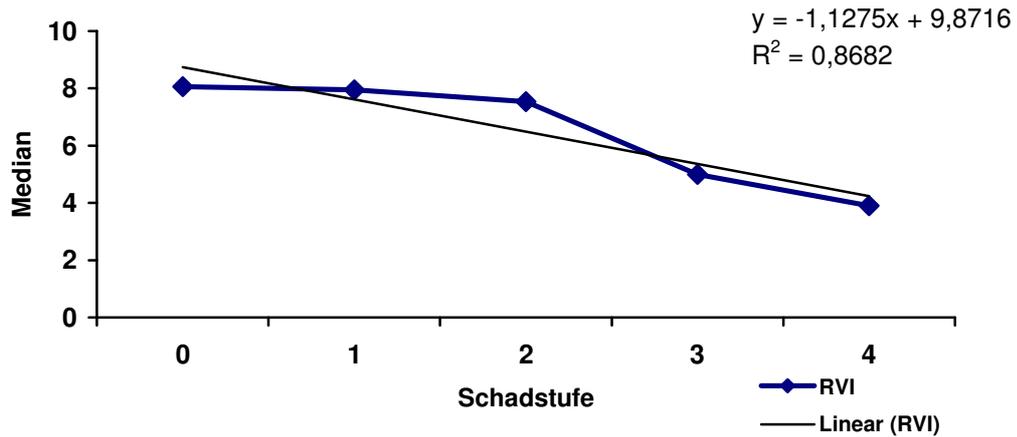


Abbildung 16 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für Summe der Grauwertinformationen aller Einzelbilder-Zentrumspixel

Der Verlauf des Graphen für den Ratio-Vegetationsindex zeigt eine eindeutige Korrelation zwischen dem Median der Grauwertverteilung und der Schadstufe als der für den NIR. Die bessere Übereinstimmung der Werte ist auch an dem Bestimmtheitsmaß des linearen Trends erkennbar. Mit $R^2 = 0,8682$ liegt es für den RVI signifikant höher als der Wert von $R^2 = 0,7821$ für den NIR-Kanal.

Es lassen sich somit vermittels einer statistisch gesicherten Teilmenge von Pixeln der Kronen Aussagen zur Schadstufe zu treffen.

6.2.2. Mosaikiertes Gesamtbild

In der Anlage 7 und Anlage 8 sind die statistischen Kenngrößen für die Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes zusammengefasst.

Speziell ausgewertet werden an dieser Stelle der Median der Grauwertverteilung des NIR-Kanals und des RVI.

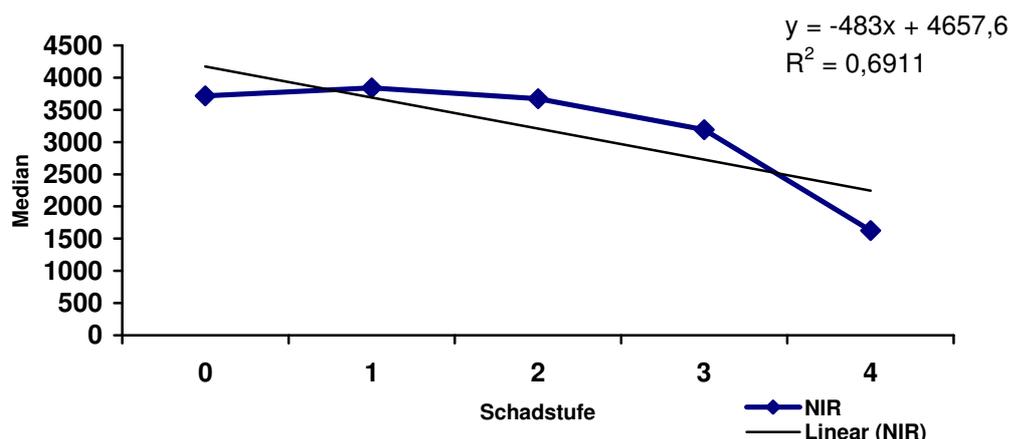


Abbildung 17 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für das NIR (mit linearem Trend), alle Angaben für Zentrumspixel mosaikiertes Gesamtbild

Wie schon im Verlauf des Graphen des NIR in den Einzelbildern ist auch hier im Bereich der Schadstufen 0 - 1 kein eindeutiger Verlauf nachweisbar. Im Intervall Schadstufe 2 - 4 ist die indirekte Proportionalität wieder deutlich erkennbar. Die großen Abweichungen zeigen sich auch an dem relativ geringen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,6911$ des linearen Trends.

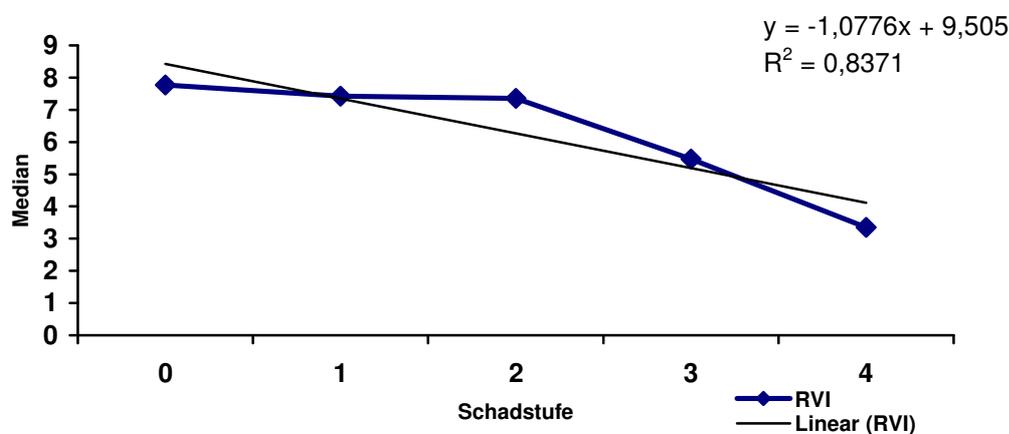


Abbildung 18 Beziehung zwischen Median und Schadstufe für den Ratio-Vegetationsindex (mit linearem Trend), alle Angaben für Zentrumspixel mosaikiertes Gesamtbild

Der Verlauf des Graphen (RVI) ist im Intervall Schadstufe 0 - 2 nicht so deutlich ausgeprägt wie in der Abbildung 14 und Abbildung 16. Trotzdem ist der Trend und damit die indirekt proportionale Beziehung zwischen dem Median der Grauwertverteilung und den Schadstufen erkennbar. Das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,8371$ ist signifikant höher als das des Graphen des NIR.

6.3. Grauwertverteilungen in den Quadranten der Kronen

Untersucht soll werden, wie sich der in den verschiedenen Einzelbildern verändernde Winkel zwischen Sonneneinfall und von der Krone reflektiertem Licht auf die Grauwertverteilung in den Quadranten (Abbildung 6) auswirkt.

Die in Kapitel 5.6.1 beschriebene Teilung der Kronen in Quadranten bewirkte, dass die Quadranten 1 und 2 den schattigen Teil und die Quadranten 3 und 4 (Abbildung 6) den sonnenbeschienenen Teil der Kronen bildeten.

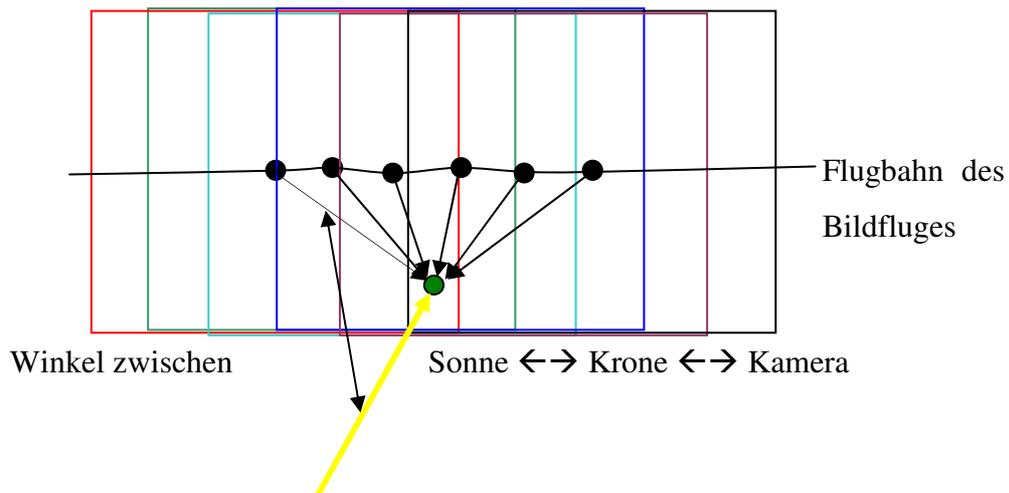


Abbildung 19 variierender Blickwinkel auf eine Krone in den aufeinander folgenden Einzelaufnahmen (Prinzipische Skizze)

Der Bildflug wurde bei einem Solar-Azimet von $151,03^\circ$ und einem Solar-Altitude von $39,49^\circ$ durchgeführt.

Bei einem Vergleich der Spektren der vier Quadranten wird von der Annahme ausgegangen, dass die Schädigung und daraus resultierend das Reflexionsverhalten in den Quadranten vergleichbar ist.

Unter diesen Bedingungen sollte in den Quadranten 3 und 4 der Mittelwert der Grauwertverteilung tendenziell höher liegen als in den Quadranten 1 und 2.

In der Anlage 9 (Seite 74) sind die Mittelwerte (NIR) für die verschiedenen Bäume je Quadrant und Einzelbild zusammengefasst.

Bei einem Vergleich fällt auf, dass mit einer Zunahme der Schadstufe auch die Zweiteilung, höhere Werte in den nördlichen und niedrigere Werte in den südlichen Quadranten, zunehmend verwischt. Spätestens in den Schadstufen 3 und 4 kann nicht mehr von einer quadrantenbezogenen Differenzierung gesprochen werden.

Es wird vermutet, dass die Grundannahme, nach der alle Quadranten gleichmäßig geschädigt sind, nicht aufrechterhalten werden kann. In besonders stark geschädigten Quadranten kommt es, bedingt durch die Zunahme des Blattverlustes und der damit verbundenen besseren Sichtbarkeit von Ästen / Boden, zu einer überproportionalen Abnahme der Reflexion im NIR. Gleichzeitig steigt die Reflexion im ROT-Kanal.

Die Luftbilder mit den 15xx und den 19xx Nummern befinden sich jeweils in einem Flugstreifen. In Anlage 9 ist erkennbar, dass das Reflexionsverhalten auch vom Flugstreifen abhängig ist. Da sich der Reflexionswinkel mit dem Flugstreifen ändert, erscheint diese Abhängigkeit logisch.

Prinzipiell kann jedoch festgestellt werden, dass eine Beziehung zwischen der Grauwertverteilung, der Lage der Quadranten und dem Lichteinfallswinkel besteht. Dies muss an geeigneter Stelle noch untersucht werden.

6.4. Grauwertverteilung je Schadstufe in den verschiedenen Luftbildern

Nachdem die prinzipielle Eignung des Medianes der Grauwertverteilung im NIR und des Ratio-Vegetationsindexes als Indikator für die Schadstufe nachgewiesen werden konnte, wird dies für jedes einzelne Luftbild überprüft.

Im ersten Durchgang wurden die Daten für die jeweils gesamte digitalisierte Kronenfläche berechnet. In einem zweiten Durchgang wurden diese Daten für die jeweiligen Zentrumspixel erhoben. Die Kronen wurden entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einer Schadstufe zusammengefasst.

Die erhobenen bzw. berechneten Daten für die Gesamtkronen sind in der Anlage 10 und Anlage 11, die für die Zentrumspixel in der Anlage 12 und Anlage 13 dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind in den genannten Tabellen die Werte für das mosaikierte Gesamtbild.

Es wurde untersucht, inwieweit die bisher festgestellte indirekte Proportionalität zwischen Median und Schadstufe auch für die Einzelbilder zu trifft.

Für einen Teil der Luftbilder liegen nicht für jede Schadstufe Informationen vor.

In den Tabellen sind die Werte, welche nicht dem Trend entsprechen, fett markiert.

Es zeigt sich, dass in dem überwiegenden Teil der Luftbilder die bereits festgestellte Beziehung ebenfalls nachgewiesen werden kann.

Dies gilt sowohl für die Betrachtung der gesamten Krone als auch für die Zentrumspixel. In den Luftbildern 1513, 1514, 1515, 1930 und 1931 (Betrachtung der Gesamtkrone und RVI) entsprechen alle Werte den genannten Regeln und es sind für alle Schadstufen Daten vorhanden. Bei der Betrachtung der Zentrumspixel gilt dies für die gleichen Luftbilder.

Für das NIR ergibt sich ebenfalls eine deutliche Übereinstimmung. Hier entsprechen die Daten in den Luftbildern 1513, 1514, 1930 und 1931 (Betrachtung der Gesamtkrone) den erwarteten Werten. Bei den Zentrumspixeln zeigen nur die Luftbilder 1930 und 1931 diese Übereinstimmung.

6.5. Methode zur Berechnung der Schadstufen

Auf der Grundlage der erhobenen und ausgewerteten Daten wird der Versuch unternommen, eine einheitliche Regel für die automatische Detektion von Schadstufen aus dem Median der Grauwertverteilung zu erstellen.

Die Datengrundlage bilden die Anlage 10 und Anlage 12 und dort die Werte für die Luftbilder 1513 – 1515, 1930 – 1931 einschließlich des mosaikierten Gesamtbildes. Für diese Luftbilder existieren vollständige Datensätze, d.h. Angaben für alle Schadstufen.

Für die weiteren Betrachtungen wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen:

- die auszuwertenden Kronen weisen eine gleichmäßige Verteilung der Schädigungen auf,
- es existieren Kronen in allen Schadstufen,
- die Art der Schädigung ist vergleichbar → z. B. NBV, VG,
- ausgewertet wird der Bereich des NIR,
- es können einzelne Luftbilder ausgewertet werden,
- es existiert ein Modell für die automatische Kronendetektion.

Wenn die Verteilung der Grauwertinformationen des NIR prinzipiell für alle Luftbilder vergleichbar ist, so kann die Lage der Mediane der einzelnen Schadstufen zum Gesamtmedian aller Schadstufen des Bildes ins Verhältnis gesetzt werden, das heißt ihre prozentualen Abweichungen vom Gesamtmedian berechnet werden. Damit ergibt sich grundsätzlich das in Abbildung 20 dargestellte Bild.

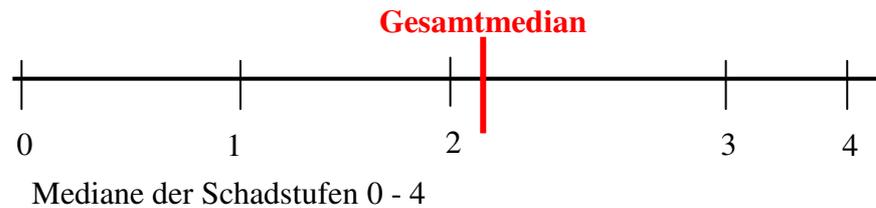


Abbildung 20 Lage der Mediane der Schadstufen zum Median der Gesamtmenge aller ausgewerteten Pixel

In der Tabelle 6 (Seite 52) wurden diese Berechnungen unter Verwendung aller Pixel der jeweiligen Kronen pro Schadstufe.

Für die Schadstufen 1 – 4 ist eine relativ gute Übereinstimmung der prozentualen Abweichungen nachweisbar. Dies gilt auch für die Werte des mosaikierten Gesamtbildes.

Eine Ausnahme bilden die Werte der Schadstufe 0, sie weisen eine Spannweite von -9,43 bis -23,24 auf. Bei der Bewertung dieser Abweichung muss berücksichtigt werden, dass für die Schadstufe 0 nur die Werte einer Baumkrone zur Verfügung standen. Die statistische Absicherung dieses Wertes ist daher nicht gegeben. Trotz der großen Abweichungen bestätigt aber sich der prinzipielle Trend.

Von Bedeutung für die automatische Auswertung ist jedoch, dass keine Überschneidung mit anderen Schadstufen erfolgt. Somit ist diese Abweichung für eine automatische Berechnung der Schadstufen von untergeordneter Bedeutung.

In der Praxis ist die Unterscheidung zwischen den Schadstufen 0 und 1 ebenfalls problematisch.

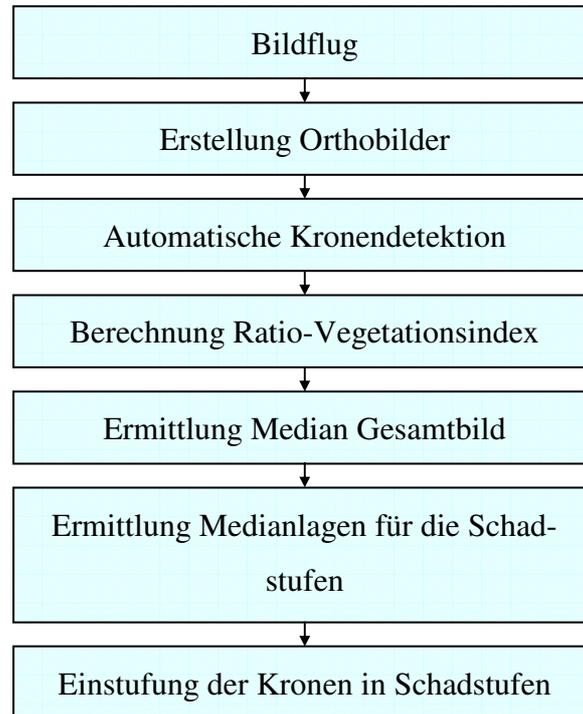


Abbildung 21 Prinzipieller Ablauf automatische Schadstufeneingruppierung

Auf eine statistische Bewertung der Streuung der Werte wird auf Grund der geringen Anzahl an Werten verzichtet.

SDST	1513	1514	1515	1930	1931	Gesamt*
0	-23,24	-20,56	-18,53	-9,43	-10,40	-8,85
1	-6,55	-8,06	-6,56	-3,60	-5,33	-4,12
2	-1,74	-1,40	-0,41	-1,29	-1,31	-1,58
3	32,23	28,79	24,04	27,60	30,09	25,59
4	39,83	39,46	38,50	33,88	36,52	36,31

Tabelle 6 prozentuale Abweichungen der Einzelmediane vom Gesamtmedian (Gesamte Krone)
*-- mosaikiertes Gesamtbild

Die für die gesamten Pixel der Kronen erfolgten Berechnungen wurden in einem weiteren Schritt mit den Zentrumspixeln durchgeführt (Tabelle 7).

Bei der Betrachtung der Berechnung für die Mediane aus den Zentrumspixeln (Tabelle 7) ist auffällig, dass die Unterschiede innerhalb der Schadstufe 0 zunehmen (-32,83 bis -10,86). Die Differenzen innerhalb der Schadstufe 1 erreichen jetzt ebenfalls Werte, die eine eindeutige Trennung zwischen den Schadstufen 0 und 1 als schwierig erscheinen lassen. Ähnliches gilt auch für die Trennung der

Schadstufen 3 und 4. Als besonders problematisch muss angesehen werden, dass sich die Spannen der Schadstufen 1 und 2 überschneiden.

SDST	1513	1514	1515	1930	1931	Gesamt*
0	-32,83	-28,71	-21,26	-11,12	-10,86	-8,15
1	-9,73	-8,97	-6,31	-2,44	-2,50	-3,32
2	-3,11	-2,14	-1,51	-1,52	-2,93	-2,34
3	32,09	29,84	24,29	41,99	39,34	29,82
4	48,11	44,21	50,45	51,71	46,92	53,28

Tabelle 7 prozentuale Abweichungen der Einzelmediane vom Gesamtmedian (Zentrumspixel)

*-- mosaikiertes Gesamtbild

In Auswertung der Tabelle 6 und Tabelle 7 können für die Schadstufen folgende generalisierte Spannen angegeben werden:

SDST	Spanne	
	Gesamte Krone	Zentrumspixel
0	< -9	< -10
1	-8 bis -3	-10 bis -2,5
2	-2 bis 0	-2,5 bis -1,5
3	24 bis 32	24 bis 42
4	> 33	> 44

Tabelle 8 Spannen für die Abweichung der Mediane der Schadstufen vom Gesamtmedian

7. Diskussion

Durch den Wandel der Anforderungen an die moderne Forstwirtschaft ist zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen die kurzfristige Bereitstellung einer Vielzahl von Informationen nötig. Vielfach werden diese auf herkömmlichen Weg erhoben, d.h. die terrestrische Vor-Ort-Begehung ist in den meisten Fällen das Mittel der Wahl. Die so erfolgte Datensammlung weist allerdings eine Reihe von Problemen auf. Neben dem hohen personellen Einsatz, der Subjektivität von Einschätzungen und der relativ umfangreichen Einarbeitungszeit entsteht häufig ein zeitlicher Verzug bei der Datenbereitstellung.

Gerade das Erkennen von Waldschäden zeigt dieses Problem besonders deutlich. Die zeitliche Spanne von der Schadentstehung (z. B. Insektenbefall) bis zu seiner Feststellung ist relativ lang. Neben der zeitlichen Problematik ist die räumliche Eingrenzung terrestrisch nur bedingt möglich. Dies liegt einerseits an der Verfügbarkeit von Personal Vor-Ort und andererseits an der Schwierigkeit der Schaderkennung. Die lokale Abgrenzung wird ein zunehmend wichtigerer Faktor, da sie direkt mit dem möglichen Einsatz von chemischen Mitteln zur Schadbekämpfung korreliert und damit den effektivsten Mitteleinsatz ermöglicht.

Luft- und Satellitenbilder werden bereits zur Unterstützung vieler Aufgaben in der Forstwirtschaft eingesetzt (HILDEBRANDT). Schwerpunkt sind hier oftmals beschreibende Attribute, wie beispielsweise die Lage. Untersuchungen zu physiologischen Fragestellungen sind in der Literatur vielfach beschrieben worden, beziehen sich aber auf Grund der Qualität der verwendeten Luftbilder nicht auf Einzelindividuen und sind daher nur schwerlich zur Beschreibung von Mischbeständen zu verwenden (BUSCHMANN; KADRO; KOCH).

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zum automatischen Erkennen von Schadstufen basiert auf terrestrisch erhobenen Waldzustandsdaten. Diese standen für 120 Traubeneichen einer forstlichen Dauerbeobachtungsfläche zur Verfügung. Die empirisch in Schadstufen klassifizierten Zustandsdaten werden jährlich erhoben.

Neben diesen Daten lagen hochauflösende 12bit Luftbilder für das Untersuchungsgebiet vor. Die Aufnahmen wurden mit der digitalen Luftbildkamera UltraCAM_D der Firma Vexcel aufgenommen und weisen eine Bodenauflösung von 0,2 m (Multispektral) auf.

In der ersten Stufe wurden die 735 verwendeten Luftbilder entzerrt und mosaikiert. Dieser Arbeitsschritt erfolgte mit der Software IMAGINE LPS. Es zeigte sich, dass die Software nur bedingt für die Triangulation (Bündellockausgleich) so großer Datenbestände geeignet ist. Neben Speicherproblemen traten wiederholt undefinierbare Programmabstürze auf. Der Versuch mit kleinen Blockgrößen zu rechnen, brachte keine positiven Ergebnisse. Eine Lösung war, jeden Flugstreifen einzeln zu berechnen und die Streifen anschließend zusammenzuführen. Dies wurde mit der Software ORIMA realisiert.

Eine weitere Fehlerquelle stellten Luftbilder dar, welche durch Belichtungsfehler über Seeflächen überbelichtet waren. Diese mussten ausgesondert werden.

Da das Resampling der Bilder mittels kubischer Konvolution erfolgte, war der Rechenaufwand zur Erstellung der Orthobilder enorm.

Die Auswahl von 39 Bäumen für die weiteren Untersuchungen erfolgte in Abhängigkeit der Sichtbarkeit auf den Luftbildern und der Schadstufenansprache. Es wurde angestrebt, für alle Schadstufen eine vergleichbare Anzahl an Individuen auszuwerten. Dieses Ziel konnte nicht erreicht werden, weil beispielsweise nur ein Baum (Nr. 255) in die Schadstufe 0 eingestuft wurde und die Schadstufe 2 mit einem Anteil von 49% an der Grundgesamtheit deutlich überrepräsentiert ist. Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten konnte keine andere Probenauswahl vorgenommen werden.

Das eindeutige Erkennen der Bäume in den Luftbildern entsprechend ihrer Lage auf der Dauerbeobachtungsfläche stellte ein großes Problem dar. Trotz der Vorlage von DGPS-Vermessungsergebnissen und der Verwendung des Stereo-Analyst war eine sichere Zuordnung nur selten möglich. Dafür gibt es eine Reihe von Ursachen. Die Bestimmung von Koordinaten mittels DGPS in Wäldern, ist bedingt durch die Überschildung durch Bäume besonders bei Laubbesatz ein bekanntes Problem. Hier ergeben sich unter Umständen bereits relativ große Fehler. Als weiteres stimmt der Fußpunkt eines Baumes nicht zwingend mit seinem Kronenmittelpunkt überein. Letztlich werden Bäume entsprechend ihrer Kraft'schen Klasse mehr oder weniger von Nachbarbäumen bedrängt, die mit ihren Ästen in die Kronen hinein wachsen. Eine eindeutige Trennung ist in diesen Fällen nicht gegeben. Das Zuordnungsproblem konnte nur durch eine Vor-Ort-Begehung gelöst werden.

Für die weitere Bearbeitung wurden die Kronenumrisse digitalisiert. Da keine den Anforderungen genügende Methode für die automatische Kronenextraktion vorlag, erfolgte die Digitalisierung der im Luftbild erkennbaren Kronenumrisse manuell. In diesem Arbeitsschritt liegt eine nicht quantifizierbare Fehlerquelle. Als schwierig gestaltete es sich, die genaue Lage der Krone, insbesondere in deren abgeschatteten Bereichen, zu erkennen. Aus dem Sichtwinkel auf die Kronen ergaben sich weitere Differenzen im Kronenumriss. Im Ergebnis zeigen sich starke Unterschiede zwischen den Kronenumrissen eines Baumes in den verschiedenen Luftbildern. Aus diesem Grund wurde diskutiert, pro Krone einen idealisierten Umriss zu bestimmen und diesen auf alle Luftbilder anzuwenden. Dieser Ansatz wurde jedoch verworfen, da der dadurch produzierte Fehler für die Einzelkrone nicht quantifizierbar und damit eine Vergleichbarkeit der Grauwerte pro Krone nicht mehr gegeben wäre.

Im Anschluss an die Digitalisierung wurden die Grauwerte der Kanäle Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot für jede erfasste Krone pro Luftbild einzeln ausgelesen und in einer Access-Datenbank gespeichert. Um im Weiteren Aussagen zur Grauwertverteilung innerhalb der Einzelkronen treffen zu können, wurden die Kronen ideell in Quadranten unterteilt. Die automatische Zuordnung der Kronenpixel in die Quadranten wurde über Datenbankabfragen realisiert. Das die Quadranten bildende Kreuz, weist Achsen in N-S- und W-E-Richtung auf. Bei dem Solar Azimut von $151,03^\circ$ lagen zum Aufnahmezeitpunkt also die nördlichen Quadranten der Kronen im Schattenbereich, während die südlichen Sonnen beschienen waren. Für eine genauere Einschätzung bezüglich der Abhängigkeit bestimmter spektraler Eigenschaften von der Lage innerhalb der Krone, wäre es zielführender gewesen, die Achse der Quadranten entsprechend dem Sonnen-Azimut auszurichten. Auf Grund der problematischen Umsetzung mit dem DBMS Access wurde auf diesen Schritt verzichtet.

Neben der Verwendung der gesamten Pixel der Einzelkronen, wurde untersucht, ob auch Teilmengen dieser Pixel eine äquivalente Aussage erlauben. Zu diesem Zweck wurden die Pixel einer Krone, welche in einem Quadrat von 9×9 Pixeln um den Mittelpunkt gruppiert waren ausgewählt und markiert.

Für alle Pixel wurden weiterhin verschiedene Vegetationsindizes berechnet.

Bei der im Anschluss erfolgten statistischen Auswertung wurde anfangs untersucht, welcher der spektralen Kanäle sich für die weiteren Auswertungen am Bes-

ten eignet. Die Spannweite der Grauwerte innerhalb der Kanäle ist ein direkter Ausdruck der Informationsdichte pro Kanal. Wie bereits vermutet, wies der Bereich des Nahen Infrarot die mit Abstand größte Spannbreite (24 – 7.123) und damit Informationsdichte auf (PRÖBSTING). Der für die Untersuchungen ebenfalls verwendete Rot-Kanal wies eine Spannweite von 2170 auf.

Bei den im Weiteren erfolgten statistischen Untersuchungen wurde die Abhängigkeit der Schadstufe von den statistischen Kenngrößen der Grauwertverteilung betrachtet. Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen wurde jedoch nicht der Grauwert des Einzelpixels ausgewertet sondern die Grauwertverteilung innerhalb des Kronenumrisses in seiner Gesamtheit.

Bei der Darstellung der statistischen Kennwerte dieser Verteilung für den NIR-Kanal und den Ratio-Vegetationsindex wurde festgestellt, dass der Median eine direkte Abhängigkeit von den Schadstufen aufweist. Betrachtet man die Histogramme der Grauwertverteilungen je Schadstufe fällt eine starke Asymmetrie auf. Die Histogramme wechseln von einer rechtsgipfligen Verteilung (Schadstufe 0) zu einer linksgipfligen Verteilung (Schadstufe 4). Die Charakterisierung einer solchen Verteilung erfolgt über den Median.

Ziel war es, eine Methode zu entwickeln, die die Ableitung der Schadstufe sowohl aus der Gesamtheit der Pixel einer Krone als auch aus Teilmengen von diesen erlaubt. In einem vorgeschalteten t-Test, ist die Größe der für eine statistische abgesicherte Aussage notwendigen Teilmenge ermittelt worden. Bei einer durchschnittlichen Pixelanzahl von 3.400 (NIR) sind für gesicherte Aussagen (Bestimmtheitsgrad 80%) mindesten 80 Pixel benötigt. Die weiteren Betrachtungen wurden sowohl für die Gesamt- als auch die Teilmenge der Pixel ausgeführt. Die Untersuchungen erfolgten an den Einzelbildern und am mosaikierten Gesamtbild.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Grauwertverteilung (NIR) der Einzelbilder eine indirekte Proportionalität zwischen den Werten des Medianes und den Schadstufen aufweist. Der Graph fällt im Bereich der Schadstufen 0 - 2 allmählich, aber signifikant ab, um dann zwischen den Schadstufen 2 und 3 einen steilen Abfall zu zeigen, welcher zwischen 3 und 4 wiederum nur gering ist. Der Graph für den Ratio-Vegetationsindex weist einen vergleichbaren Verlauf auf, wobei dieser insgesamt harmonischer erfolgt. Der Sprung zwischen den Schadstufen 2 und 3 erklärt sich durch die bessere Sichtbarkeit von Ästen und Boden auf Grund der zunehmend fehlenden Belaubung (Chlorophyll). Dies bedingt eine Verringerung der

Reflexion im NIR. Die in diesem Zusammenhang normalerweise erwartete Erhöhung des Reflexes im ROT ist nur undeutlich ausgeprägt.

Die hier aufgezeigte Abhängigkeit zwischen Median und Schadstufe ist auch für das mosaikierte Gesamtbild nachweisbar, allerdings bei deutlich harmonischerem Verlauf des Graphen. Dies wird auf den für die Berechnung des mosaikierten Gesamtbildes verwendeten Rechenalgorithmus (IMAGINE 8.7) zurückgeführt. Die in den Einzelbildern vorhandenen starken Schwankungen werden durch die Berechnung nivelliert. Es ist daher empfehlenswert für die Schadstufenberechnung mosaikierte Gesamtbilder zu verwenden. Dies lässt sich auch aus den beispielhaften Betrachtungen für je einen Baum pro Schadstufe und Ortholuftbild ableiten. Die prinzipielle Tendenz der Verteilung ist in jedem Luftbild analog, jedoch sind starke Variationen der Minima und Maxima und damit auch des Medianes zu beobachten.

Neben der Betrachtung der Grauwertverteilung (NIR; RVI) in den Einzelbildern als auch in dem mosaikierten Gesamtbild, wurden diese auch für Teilmengen der Pixel der Gesamtkronen durchgeführt. Durch Untersuchung der hier Zentrumspixel genannten Teilmengen wurde nachgewiesen, dass die für die Gesamtmenge der Kronenpixel zutreffenden Aussagen auch auf Teilmengen anwendbar sind. Wie schon bei der Darstellung der Gesamtmengen zeigen sich auch hier Unterschiede hinsichtlich des Verlaufes der Graphen des NIR und des Ratio-Vegetationsindexes. Der Graph des Ratio-Vegetationsindexes zeigt eine deutlichere Strukturierung und eignet sich daher besser zur automatischen Herleitung der Schadstufen.

Prinzipiell kann festgestellt werden, dass die Schadstufen sowohl aus den Gesamtmengen der Pixel, als auch aus Teilmengen berechnet werden können.

Die besten Übereinstimmungen zwischen den berechneten Werten und den terrestrisch erfassten Werten werden bei Verwendung des Ratio-Vegetationsindexes erreicht.

Bei der Verwendung von Teilmengen muss jedoch mit in die Überlegung einbezogen werden, dass dieser Bestimmungsweg einen größeren systematischen Fehler aufweist. Die zur Verwendung kommenden Zentrumspixel bilden einen bestimmten, zusammenhängenden Bereich der Krone ab. Nur unter der Annahme, dass sich Schäden gleichmäßig über den Gesamtbereich der Krone verteilen, kann davon ausgegangen werden, dass die Zentrumspixel repräsentativ für die Gesamt-

krone sind. In der Realität kommt es durch Absterben einzelner Äste eher zur Ausbildung von Löchern im Kronendach. Diese Überlegungen sind allerdings nur für die Betrachtung einzelner Kronen von Interesse. Wird die entwickelte Methode zur Charakterisierung größerer Waldareal verwendet, können statistisch gesicherte Aussagen erwartet werden.

Die Untersuchung der Grauwertverteilung innerhalb der Quadranten einer Krone ergab die bereits beschriebene Abhängigkeit von der Schadstufe, wobei die Korrelation Schadstufe \leftrightarrow Grauwertverteilung für gering geschädigte Bäume eindeutiger war, als für stark geschädigte Individuen. Dieser Effekt lässt sich relativ einfach deuten. Bei einer geringen Schädigung kommt es zur Ausprägung eines deutlichen Schattens (Quadrant 1 und 2) und aufgehellten Bereichen durch die direkte Sonneneinstrahlung (Quadrant 3 und 4). Dies führt zu einem differenzierten Reflexionsverhalten. Mit steigender Schadstufe nimmt die Belaubung und damit auch die Ausprägung von Licht- und Schattenseite ab, was gleichzeitig zu einer geringeren Differenzierung des reflektierten Lichtes führt.

Auf der Grundlage der bisher diskutierten Sachverhalte, wurde eine Methodik zur Bestimmung von Schadstufen entwickelt.

Die Leitgedanken bei der Erstellung der Methodik sind:

- Die auszuwertenden Kronen weisen eine gleichmäßige Verteilung der Schädigungen auf.
- Es existieren Kronen in allen Schadstufen.
- Die Art der Schädigung ist vergleichbar \rightarrow z. B. NBV, VG.
- Ausgewertet wird der Bereich des NIR.
- Die Auswertung eines Luftbildes ist statistisch sinnvoll.
- Es liegt ein Modell für die automatische Kronendetektion vor.

Auf dieser Grundlage lässt sich feststellen:

Der Median der Grauwertverteilungen aller Kronenpixel (Gesamtmedian) steht in einem definierbaren Verhältnis zu den Medianen der Kronenpixel pro Schadstufe.

Aus den gewonnenen Daten wurden Spannen für die Lage der Mediane der einzelnen Schadstufen berechnet, wobei diese prozentuale Abweichungen vom Gesamtmedian darstellen. Bei Kenntnis des Gesamtmedianes und der Anwendung dieser Spannen lassen sich Aussagen zur Schädigung einzelner Kronen treffen.

Bei Verwendung der Zentrumspixel für die Schadstufeneingruppierung nimmt die Treffsicherheit der Schadansprache signifikant ab.

8. Zusammenfassung

Die formulierten Zielstellungen der Arbeit wurden mit der Beschreibung einer Methode zur automatischen Extraktion von Schadstufen aus digitalen 12bit Luftbildern erreicht.

Dafür wurden neben terrestrisch erhobenen Waldzustandsdaten der forstlichen Dauerbeobachtungsfläche „Göhrener Tannen“ die Grauwertverteilungen von Traubeneichen Kronen aus digitalen Luftbildern extrahiert und analysiert.

Die Befliegung des Naturwaldreservates „Heilige Hallen“ erfolgte August 2004 im Auftrag des Landesamtes für Forsten und Großschutzgebiete des Landes Mecklenburg-Vorpommern. Zum Einsatz kam die digitale Luftbildkamera Ultra-CAM_D. Die gesamte aufgenommene Szene bestand aus 7 Flugstreifen zu je 105 Luftbildern. Da die Dauerbeobachtungsfläche Teil einer größeren Waldfläche ist, mussten alle 735 Luftbilder zur Erstellung der Ortholuftbilder herangezogen werden. Die Aerotriangulation erfolgte mittels Bündelblockausgleich. Aus den 14 Luftbildern, die das Untersuchungsgebiet abdecken, wurde ein mosaikiertes Gesamtbild erstellt. Die Bearbeitung erfolgte mit der Software IMAGINE 8.7.

Für 39 Einzelbäume wurden insgesamt 338 Reflexionsspektren aus 14 Ortholuftbildern und einem mosaikierten Gesamtbild extrahiert. Die Identifikation der Kronen erfolgte mittels DGPS-Daten, Stereo-Analyst und Vor-Ort-Begehung.

Zur Verwaltung der aus den Einzelspektren gewonnenen Grauwerten der Kanäle ROT, GRÜN, BLAU und Nahes Infrarot wurde eine Access-DB erstellt. Die Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistik Software SPSS 11.5.

Im Ergebnis der Datenanalyse wurde die Tauglichkeit, insbesondere des Nahen Infrarot und des Ratio-Vegetationsindex, für Aussagen zur Schadstufeneingruppierung festgestellt.

Die Ermittlung der Schadstufen erfolgte nicht auf der Grundlage von Grauwerten einzelner Pixel, sondern aus summarischen statistischen Kenngrößen der Grauwertverteilung der Gesamtkrone. In Auswertung der Histogramme von Einzelkronen der verschiedenen Schadstufen wurde eine starke Asymmetrie der Verteilungen sichtbar. Eine typische statistische Kenngröße zur Charakterisierung derartiger Verteilungen ist der Median, welcher daher für die weiteren Untersuchungen verwendet wurde.

Zwischen dem Median der Grauwertverteilung und der Schadstufe wurde eine indirekte Proportionalität festgestellt. Wird der Median (Gesamtmedian) der Grauwertverteilungen innerhalb aller Kronen eines Bildes bestimmt, so stehen die Mediane der Grauwertverteilungen der verschiedenen Schadstufen in einem determinierten Verhältnis zum Gesamtmedian. In Kenntnis dieses Sachverhaltes besteht die Möglichkeit, für Einzelkronen Aussagen über ihre Zugehörigkeit zu bestimmten Schadstufen zu treffen. Gesicherte Einstufungen sind auch bei Verwendung von Teilmengen der Kronenpixel möglich.

Damit ist es, im Zusammenhang mit Algorithmen zur automatischen Kronenerkennung möglich, statistische gesicherte Aussagen zur Schädigung von Einzelindividuen zu treffen.

9. Literaturverzeichnis

- Abschlussbericht der Befliegung Heilige Hallen mit der digitalen Kamera UltraCAM_D. International Forestry Modelling Systems GmbH & Co. KG, Pasewalk 2004
- ALBERTZ; J.: Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2001
- AKCA, A.: Waldinventur. J.D. Sauerländer's Verlag ,Frankfurt am Main 2001
- Arbeitsanweisung zum Waldzustandsmonitoring auf den Flächen der Waldzustandserhebung (WZE) und Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK). Landesamt für Forsten und Großschutzgebiete Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 2005
- AWD 1997 Arbeitsgemeinschaft Dauerbeobachtungsflächen-Waldschäden der Länder und des Bundes (Hrsg.)
- BUSCHMANN, C.: NAGEL, E.: Reflexionsspektren von Blättern und Nadeln als Basis für die physiologische Beurteilung von Baumschäden. Forschungsbericht Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Januar 1992
- CHOEN, K.: Entwicklung eines Signaturparameters zur quantitativen Erfassung des Kronenzustandes der mitteleuropäischen Hauptbaumarten in CIR-Luftbildern. Dissertation, Universität Freiburg, 1988
- Datenspeicher Wald Landesforstverwaltung Mecklenburg-Vorpommern – Anstalt öffentlichen Rechts -; Stand 2005
- DENZEL, St.: Analyse der Entwicklung eines Naturwaldes mit Hilfe von Luftbildern am Beispiel der Heiligen Hallen. Diplomarbeit TU Berlin, 2003
- FUCHS, H.-J.; FRICKE, U.; MAGDON, P.; PADERBERG, D.; SIEWERT, M.: BÖTTCHER, K.: Untersuchungen zur Eignung der digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCAM_D für forstliche und landschaftsökologische Anwendungen. Rostock, 2005
- FUCHS, H.-J.: Methodische Ansätze zur Erfassung von Waldbäumen mittels digitaler Luftbilddaten. Dissertation, Göttingen 2003

- GÄHLER, M.; JANOWSKY, R.; SCHIEWE, J.: Automatische Ableitung von Biootypen aus räumlich höchst aufgelösten, multispektralen Bild- und Laserscanning-Daten. Zeitschrift Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. Jahrgang 2004, Heft 6 Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- GOUGEON, F.; LECKIE, D.G.: Forest information extraction from high spatial resolution images using an individual tree crown approach, Information report BC-X396, Canadian Forest Service, British Columbia 2003
- HABERÄCKER, P.: Praxis der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. FH München, 2000
- HARTMANN, G.; NIENHAUS, F.; BUTIN, H.: Farbatlas Waldschäden. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1995
- HENNINGER, J.; HILDEBRANDT, G.: Bibliography of publications on damage assessment in forestry and agriculture by remote sensing techniques. 2. Freiburg. Universität Freiburg, 1980
- HILDEBRANDT, G.: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann Verlag, Heidelberg 1996
- HINZ, A.; DÖRSTEL, Ch.; HEIER, H.: DMC – Digital Modular Camera : Systemkonzept und Ablauf der Datenverarbeitung. Zeitschrift für Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. Jahrgang 2001, Heft 3 Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- JÄHNE, B.: Digitale Bildverarbeitung. Springer Verlag Heidelberg 2002
- KADRO, A.: Untersuchung der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände. Dissertation, Freiburg i. Br. 1981
- KRAUS, K.: Photogrammetrie, Grundlagen und Standardverfahren – Band 1. H. Stam GmbH Verlag, Bonn 2000
- KOCH, B.: Untersuchungen zur Reflexion von Waldbäumen mit unterschiedlichen Schadsymptomen auf der Grundlage von Labor- und Geländemessungen. Dissertation, München 1987
- KÖHL, M.; DEES, m.: Statistische Analysen von Kronenzustandsdaten aus der Interpretation von CIR-Luftbildern. Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg 2004

- LANDAUER, G. ; VOSS, H.-H.: Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung: Abschlussdokumentation, Teil B 7. Oberpfaffenhofen : DLR, 1989
- LANDESAMT FÜR FORSTEN UND GROßSCHUTZGEBIETE (LfG): Forstliche Standortskartierung in Mecklenburg-Vorpommern, Teil A Wuchsgebiete und Wuchsbezirke, Bd. II: Wuchsgebiete, Malchin 2003
- PRÖBSTING, T.: Luftbildgestützte Verfahren für die Forstwirtschaft: Bedarf, Anwendungsbereiche, Auswertungssysteme, Univ. Göttingen, Dissertation, 1996
- RÜGER, W.; PIETSCHNER, J., REGENSBURGER, K.: Photogrammetrie. Verlag für Bauwesen, Berlin 1987
- SANDAU, R.: Digitale Luftbildkamera. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg 2005
- SCHOWENGERDT, R. A.: Remote Sensing – Models and Methods for Image Processing. Academic Press, London 1997
- WALDSCHADENSBERICHT 2004,
- WANG, L.; GONG, P.; BIGING, G. S.: Automated individual tree crown delineation and treetop detection in high-spatial resolution aerial imagery. (2002). URL <http://www.cobblestoneconcepts.com/ucgis2summer2002/wang/wang.htm> (Stand 10/2005)

Schadstufe		ROT	GRÜN	BLAU	NIR
0	Mittelwert	481,7742	1191,8841	205,6225	3924,2454
	N	28205	28205	28205	28205
	Standardabweichung	151,42922	200,84150	23,50030	944,91442
	Spannweite	793	1149	144	5250
	Median	452	1211	204	3876
1	Mittelwert	485,3646	1166,8078	205,5852	3778,8156
	N	215388	215388	215388	215388
	Standardabweichung	151,40589	240,80610	28,78931	1029,98654
	Spannweite	887	1462	208	6027
	Median	473	1171	204	3774
2	Mittelwert	492,9190	1156,4687	207,2203	3637,2172
	N	584622	584622	584622	584622
	Standardabweichung	153,25938	247,81121	25,71786	975,74054
	Spannweite	1218	2327	323	7099
	Median	474	1153	206	3609
3	Mittelwert	417,9717	997,2376	195,8793	2145,5565
	N	89570	89570	89570	89570
	Standardabweichung	165,71007	261,40126	33434	855,47533
	Spannweite	1960	2649	338	5545
	Median	392	960	193	1951
4	Mittelwert	505,2483	1151,3547	221,1490	2337,7805
	N	113032	113032	113032	113032
	Standardabweichung	189,43530	370,83050	40,70310	932,33421
	Spannweite	2010	2457	354	5324
	Median	482	1078	216	2003
Insgesamt	Mittelwert	485,8752	1145,2013	207,3768	3402,5570
	N	1030817	1030817	1030817	1030817
	Standardabweichung	159,78118	266,83409	29,54274	1129,08512
	Spannweite	2170	3180	483	7099
	Median	468	1140	206	3423

Anlage 1 Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR, nur Einzelbilder in Abhängigkeit von den Schadstufen

Schadstufe		RVI	NDVI	TNDVI	DD	GR-Rot
0	Mittelwert	8,3944	0,7836	1,1329	6380,4551	710,1099
	N	28205	28205	28205	28205	28205
	Standardabweichung	1,21789	0,02755	0,01216	1625,46971	166,64696
	Spannweite	6,62	0,18	0,08	9026	918
	Median	8,0613	0,7793	1,1311	6289	683
1	Mittelwert	7,9283	0,7731	1,1283	6111,0440	681,4432
	N	215388	215388	215388	215388	215388
	Standardabweichung	1,01101	0,02575	0,01143	1756,86129	171,14523
	Spannweite	8,47	0,25	0,11	10322	1015
	Median	7,8893	0,7750	1,1292	6094	659
2	Mittelwert	7,5277	0,7620	1,1233	5832,2670	663,5497
	N	584622	584622	584622	584622	584622
	Standardabweichung	1,04349	0,02861	0,01275	1637,53828	163,90615
	Spannweite	8,95	0,30	0,14	11951	1386
	Median	7,4051	0,7620	1,1234	5781	641
3	Mittelwert	5,2598	0,6711	1,0818	3071,7830	579,2658
	N	89570	89570	89570	89570	89570
	Standardabweichung	,99551	0,06068	0,02866	1406,26757	124,09951
	Spannweite	7,16	0,60	0,30	8985	982
	Median	5,3496	0,6850	1,0886	2724	559
4	Mittelwert	4,7979	0,6366	1,0653	3240,1070	646,1064
	N	113032	113032	113032	113032	113032
	Standardabweichung	1,30543	0,08518	0,04057	1523,40811	229,72812
	Spannweite	7,94	0,61	0,31	8852	1498
	Median	4,7098	0,6497	1,0723	2646	570
Insgesamt	Mittelwert	7,1387	0,7433	1,1147	5381,4142	659,3262
	N	1030817	1030817	1030817	1030817	1030817
	Standardabweichung	1,52035	0,06220	0,02875	1970,90733	173,20682
	Spannweite	10,99	0,66	0,33	11951	1800
	Median	7,2304	0,7570	1,1212	5440	632

Anlage 2 Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index, nur Einzelbilder in Abhängigkeit von den Schadstufen

Schadstufe		ROT	GRÜN	BLAU	NIR
0	Mittelwert	517,0824	1192,8384	216,7902	3982,4660
	N	3689	3689	3689	3689
	Standardabweichung	139,42428	264,66324	32,33879	1134,65374
	Spannweite	620	1160	149	4700
	Median	538	1234	222	4178
1	Mittelwert	534,3890	1196,5215	209,4111	3908,6077
	N	18568	18568	18568	18568
	Standardabweichung	152,58789	293,42433	30,56544	1140,80947
	Spannweite	739	1495	197	5756
	Median	535	1204,5000	209	3972
2	Mittelwert	499,3503	1144,0840	203,9964	3551,7164
	N	89330	89330	89330	89330
	Standardabweichung	152,63376	295,02998	29,76625	1095,24403
	Spannweite	948	1763	204	6723
	Median	498	1149	204	3584
3	Mittelwert	449,8692	1015,2281	196,1121	2369,3107
	N	11273	11273	11273	11273
	Standardabweichung	154,81808	275,45498	30,06478	956,16928
	Spannweite	884	1587	180	5543
	Median	440	1005	194	2166
4	Mittelwert	488,1428	1065,6272	210,8115	2080,1388
	N	13756	13756	13756	13756
	Standardabweichung	220,20484	371,21105	48,37416	1088,46810
	Spannweite	1667	2292	343	5672
	Median	445	996,5000	204	1719
Insgesamt	Mittelwert	499,3799	1133,9949	205,1134	3366,1123
	N	136616	136616	136616	136616
	Standardabweichung	161,77864	304,90615	32,58381	1229,63573
	Spannweite	1710	2361	345	6723
	Median	495	1133	204	3413

Anlage 3 Statistische Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR, nur mosaikiertes Gesamtbild in Abhängigkeit von den Schadstufen

Schadstufe		RVI	NDVI	TNDVI	DD	GR-Rot
0	Mittelwert	7,6694	0,7687	1,1263	6471,8013	675,7560
	N	3689	3689	3689	3689	3689
	Standardabweichung	0,46073	0,01218	541	1909,88070	127,34770
	Spannweite	3,25	0,09	0,04	7847	554
	Median	7,6385	0,7685	1,1263	6783	692
1	Mittelwert	7,3090	0,7576	1,1214	6295,7159	662,1325
	N	18568	18568	18568	18568	18568
	Standardabweichung	0,67170	0,02065	925	1890,72344	144,78898
	Spannweite	5,34	0,19	0,09	9528	813
	Median	7,3064	0,7592	1,1222	6404	667
2	Mittelwert	7,1279	0,7516	1,1187	5663,9948	644,7337
	N	89330	89330	89330	89330	89330
	Standardabweichung	0,77868	0,02509	0,01129	1804,31784	146,72213
	Spannweite	8,07	0,39	0,18	11326	979
	Median	7,1281	0,7539	1,1198	5697,5000	649
3	Mittelwert	5,3767	0,6693	1,0808	3469,6363	565,3588
	N	11273	11273	11273	11273	11273
	Standardabweichung	1,48597	0,07639	0,03572	1643,36500	128,99626
	Spannweite	6,93	0,41	0,20	9450	779
	Median	5,2212	0,6785	1,0856	3044	559
4	Mittelwert	4,4213	0,6029	1,0485	2817,3191	577,4844
	N	13756	13756	13756	13756	13756
	Standardabweichung	1,36523	0,11785	0,05835	1796,75417	159,17787
	Spannweite	6,57	0,63	0,32	9303	884
	Median	4,4692	0,6343	1,0650	2150	548
Insgesamt	Mittelwert	6,7501	0,7311	1,1091	5303,9632	634,6150
	N	136616	136616	136616	136616	136616
	Standardabweichung	1,30142	0,06879	0,03268	2101,53481	149,08790
	Spannweite	9,29	0,68	0,35	11404	979
	Median	7,0172	0,7505	1,1183	5409	635

Anlage 4 Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index, nur mosaikiertes Gesamtbild in Abhängigkeit von den Schadstufen

Schadstufe		ROT	GRÜN	BLAU	NIR
0	Mittelwert	462,9855	1139,1981	202,8760	3866,7890
	N	621	621	621	621
	Standardabweichung	113,89152	157,25652	19,56954	544,19246
	Spannweite	498	663	106	2985
	Median	451	1140	201	3785
1	Mittelwert	506,7623	1192,3560	211,5162	3969,5959
	N	5056	5056	5056	5056
	Standardabweichung	130,13441	210,11329	27,21333	783,22025
	Spannweite	644	1104	155	4539
	Median	500	1179	209	3966,5
2	Mittelwert	503,4838	1178,6705	208,9240	3757,8690
	N	13585	13585	13585	13585
	Standardabweichung	129,39993	217,70269	21,38518	738,15674
	Spannweite	740	1372	140	4468
	Median	489	1185	209	3751
3	Mittelwert	489,1334	1104,4218	208,7015	2365,5245
	N	2084	2084	2084	2084
	Standardabweichung	173,14590	284,12620	37,75811	879,74847
	Spannweite	1071	1776	244	3959
	Median	503	1093	209	2269,5
4	Mittelwert	595,3547	1297,9975	244,8331	2302,6631
	N	3259	3259	3259	3259
	Standardabweichung	219,20842	420,92795	50,27277	741,99860
	Spannweite	1379	2340	275	3205
	Median	565	1226	239	2046
Insgesamt	Mittelwert	514,0885	119029	214,0414	3493,4499
	N	24605	24605	24605	24605
	Standardabweichung	151,71849	261,64648	31,88383	978,28642
	Spannweite	1446	2384	290	5468
	Median	499	1177	211	3578

Anlage 5 Statistische Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel der Einzelbilder)

Schadstufe		RVI	NDVI	TNDVI	DD	GR-Rot
0	Mittelwert	8,6231	0,7885	1,1351	6334,2705	676,2126
	N	621	621	621	621	621
	Standardabweichung	1,28449	0,02728	0,01201	913,77936	163,32526
	Spannweite	5,01	0,12	0,05	4893	600
	Median	8,0600	0,7793	1,1310	6216	646
1	Mittelwert	846	0,7751	1,1292	6451,5898	685,5938
	N	5056	5056	5056	5056	5056
	Standardabweichung	5,46	0,13	0,06	7742	836
	Spannweite	5,46	0,13	0,06	7742	836
	Median	7,9483	0,7765	1,1298	6474	642
2	Mittelwert	7,6228	0,7653	1,1248	6042,5075	675,1867
	N	13585	13585	13585	13585	13585
	Standardabweichung	0,94262	0,02523	0,01122	1227,18404	161,85868
	Spannweite	5,55	0,15	0,07	7075	855
	Median	7,5411	0,7658	1,1251	6017	649
3	Mittelwert	4,9504	0,6521	1,0728	3346,1953	615,2884
	N	2084	2084	2084	2084	2084
	Standardabweichung	1,02880	0,07077	0,03388	1513,05339	134,80502
	Spannweite	5,34	0,42	0,21	6378	759
	Median	4,9990	0,6666	1,0801	3033,5000	589
4	Mittelwert	4,1382	0,5851	1,0405	2956,8070	702,6428
	N	3259	3259	3259	3259	3259
	Standardabweichung	1,33032	0,10318	0,05009	1194,28456	259,32246
	Spannweite	6,29	0,52	0,26	5458	1430
	Median	3,8972	0,5916	1,0448	2507	610
Insgesamt	Mittelwert	7,0386	0,7345	1,1104	5496,8498	675,9144
	N	24605	24605	24605	24605	24605
	Standardabweichung	1,73149	0,08245	0,03869	1792,79020	178,14462
	Spannweite	9,59	0,58	0,29	9196	1430
	Median	7,3142	0,7594	1,1223	5726	637

Anlage 6 Statistische Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel der Einzelbilder)

Schadstufe		ROT	GRÜN	BLAU	NIR
0	Mittelwert	495,6889	1141,3111	212	3848,6889
	N	90	90	90	90
	Standardabweichung	67,39780	131,94931	16,77947	438,76585
	Spannweite	280	531	61	1758
	Median	477,5000	1095	207	3715
1	Mittelwert	519,8102	1160,3759	209,0658	3887,7669
	N	532	532	532	532
	Standardabweichung	150,60374	285,16198	30,98814	1139947
	Spannweite	622	1205	136	4740
	Median	520	1186,5000	211	3842
2	Mittelwert	516,1895	1173,3938	206,6115	3716,2262
	N	1879	1879	1879	1879
	Standardabweichung	122,53006	239,64590	21,12598	789,05029
	Spannweite	734	1452	133	4544
	Median	514	1177	207	3670
3	Mittelwert	540,2923	1200,7007	214,3109	3281,4640
	N	431	431	431	431
	Standardabweichung	110,09914	211,48644	21,43136	1157,55371
	Spannweite	560	1079	144	4617
	Median	543	1230	215	3190
4	Mittelwert	618,6275	1249,5100	249,9180	1939,9224
	N	451	451	451	451
	Standardabweichung	262,52741	386,01592	66,34506	767,77424
	Spannweite	1442	1964	314	3336
	Median	593	1243	243	1626
Insgesamt	Mittelwert	532,9406	1184,1194	213,8951	3454,5312
	N	3383	3383	3383	3383
	Standardabweichung	154,71010	267,27537	35,44555	1088,45070
	Spannweite	1548	2156	319	5296
	Median	523	1187	210	3528

Anlage 7 Stat. Kenngrößen für die Kanäle R, G, B und NIR in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes)

Schadstufe		RVI	NDVI	TNDVI	DD	GR-Rot
0	Mittelwert	7,7915	0,7722	1,1279	6272,3778	645,6222
	N	90	90	90	90	90
	Standardabweichung	0,31911	822	364	702,05668	67,45911
	Spannweite	1,32	0,03	0,02	2788	263
	Median	7,7670	0,7719	1,1278	6019,5000	628,5000
1	Mittelwert	7,4874	0,7633	1,1239	6304,4135	640,5658
	N	532	532	532	532	532
	Standardabweichung	0,57820	0,01612	718	1892,19749	138,48617
	Spannweite	3,37	0,10	0,05	7823	612
	Median	7,4205	0,7625	1,1236	6184	657
2	Mittelwert	7,2903	0,7567	1,1210	5949,4806	657,2044
	N	1879	1879	1879	1879	1879
	Standardabweichung	0,75206	0,02263	0,01012	1282,15626	121,44791
	Spannweite	5,18	0,16	0,07	7345	755
	Median	7,3500	0,7605	1,1227	5845	662
3	Mittelwert	6,2257	0,6938	1,0918	5036,2459	660,4084
	N	431	431	431	431	431
	Standardabweichung	2,29357	0,09527	0,04386	2230,20171	113,95850
	Spannweite	7,74	0,36	0,17	8332	582
	Median	5,4690	0,6908	1,0913	4594	669
4	Mittelwert	3,4572	0,5139	142	2261,6253	630,8825
	N	451	451	451	451	451
	Standardabweichung	1,21150	0,14432	0,07430	1343,18250	136,51057
	Spannweite	4,73	0,56	0,29	6193	556
	Median	3,3550	0,5408	1,0202	1949	629
Insgesamt	Mittelwert	6,6880	0,7178	1,1023	5405,8974	651,1788
	N	3383	3383	3383	3383	3383
	Standardabweichung	1,72829	0,10542	0,05125	2001,84094	124,72553
	Spannweite	9,11	0,67	0,34	9812	755
	Median	7,2112	0,7564	1,1209	5599	657

Anlage 8 Stat. Kenngrößen für die verschiedenen Vegetations-Index in Abh. von den Schadstufen (nur Zentrumspixel des mosaikierten Gesamtbildes)

Quadrant	Ortholuftbilder														
	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	Gesamt*	
Baum-Nr.: 255; Schadstufe: 0															
1			2603	3012	3125					3683	4258	3717	3787	3481	
2			3115	3482	3494					3918	3835	3915	3749	3732	
3			3222	3690	3774					4669	4671	4934	4963	4713	
4			3435	3697	3873					4880	4847	5029	4794	4228	
Baum-Nr.: 95; Schadstufe: 1															
1			2686	3061	3249	3082			2324	3474	3320	3388	3551	3300	
2			3319	3541	3615	3335			2876	4020	3742	3851	3674	3887	
3			2846	3376	3821	3550			3191	4813	4673	4794	4895	4627	
4			4076	4261	4283	4087			3539	5079	4737	5044	4902	5056	
Baum-Nr.: 110; Schadstufe: 2															
1			2476	2771	3096	2942			1948	2966	2961	3067	3058	2636	
2			2863	3083	3258	3065			2371	3278	3214	3190	3105	3065	
3			2559	3014	3263	3352			2569	3843	3929	4150	4138	3613	
4			3188	3547	3681	3084			2699	3872	3727	3851	3766	3368	
Baum-Nr.: 340; Schadstufe: 3															
1		1428	2147	2205	2398			1129	1529	1587	1639			2163	
2		1506	1575	1931	2089			1298	1404	2147	2063			1843	
3		1240	1380	1668	1910			1288	1353	2128	2244			1728	
4		1469	1702	1777	2259			1385	1531	2122	2175			1971	
Baum-Nr.: 108; Schadstufe: 4															
1				2744	2830	2776	2651			1763	1971	1956	2090	2436	2114
2				2988	3611	3857	3376			2473	2711	2309	2056	2982	3050
3				1779	1999	2258	2289			1146	1664	1838	1944	1767	1753
4				2250	2544	2889	2440			1278	1562	1527	1561	1742	1449

Anlage 9 Mittelwert der Grauwertverteilung (NIR) beispielhaft für je einen Baum pro Schadstufe

* -- mosaikiertes Gesamtbild

SDST	Ortholuftbilder														
	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Gesamt*
0	k.A.	k.A.	9,9690	9,5739	9,4359	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	7,4545	7,4560	7,6204	7,2533	k.A.	7,6385
1	8,0894	7,8080	8,6193	8,5813	8,4831	8,4777	8,8480	8,1476	8,1626	7,0569	7,1132	7,3627	6,9984	7,4395	7,3064
2	6,9170	7,9291	8,2299	8,0520	7,9934	7,8233	7,9181	7,5757	8,1300	6,9000	6,8422	7,0803	6,7518	6,7944	7,1281
3	5,2750	5,1631	5,4822	5,6552	6,0467	4,3642	k.A.	5,7879	5,7541	4,9318	4,7216	k.A.	k.A.	k.A.	5,2212
4	k.A.	k.A.	4,8669	4,8072	4,8956	5,5556	5,5730	k.A.	4,8553	4,5042	4,2868	4,3000	4,3897	4,4706	4,4692
Gesamt	5,8796	6,2739	8,0891	7,9411	7,9606	7,7056	7,9864	6,7402	7,6364	6,8119	6,7535	7,0678	6,6979	6,8169	7,0172

Anlage 10 Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den Ratio-Vegetationsindex RVI in Abhängigkeit von den Schadstufen (gesamte Krone)
*-- mosaikiertes Gesamtbild

SDST	Ortholuftbilder														
	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Ge-
0	k.A.	k.A.	3177	3578	3630	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	4393	4408	4498	4343	k.A.	4178
1	2875	3384	3120	3558	3727	3994	3926	2305	2897	4143	4078	4211	4187	4402	3972
2	3046	3216	3029	3392	3543	3690	4097	2645	2814	3767	3860	3915	3867	4362	3584
3	1738	1882	2287	2425	3138	2005	k.A.	1329	1462	2173	2110	k.A.	k.A.	k.A.	2166
4	k.A.	k.A.	2006	2147	2308	2615	3241	k.A.	1220	1777	1845	1890	1858	1923	1719
Gesamt	2119	2551	2921	3284	3490	3570	3856	1811	2429	3658	3673	3867	3789	4079	3413

Anlage 11 Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den NIR-Kanal in Abhängigkeit von den Schadstufen (gesamte Krone)
*-- mosaikiertes Gesamtbild

SDST	Ortholuftbilder														
	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Gesamt*
0	k.A.	k.A.	10,4904	10,1716	9,6724	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	7,7549	7,6563	7,7727	7,2949	k.A.	7,7670
1	8,2903	7,9292	8,6663	8,6114	8,4800	8,3955	9,5232	8,3302	8,2939	7,1495	7,0794	7,3160	7,0126	7,7203	7,4205
2	6,9721	8,1632	8,1435	8,0716	8,0972	7,8866	7,9226	7,6944	8,1086	7,0854	7,1087	7,2318	6,9634	6,9554	7,3500
3	4,4856	4,8487	5,3636	5,5445	6,0393	3,4985	k.A.	5,4883	5,0431	4,0484	4,1896	k.A.	k.A.	k.A.	5,0405
4	k.A.	k.A.	4,0980	4,4090	3,9523	5,5600	3,3321	k.A.	4,1501	3,3701	3,6660	3,7802	3,7828	3,2648	3,3550
Gesamt	5,2527	7,5781	7,8977	7,9026	7,9766	7,4625	7,6535	7,5272	7,9237	6,9791	6,9065	7,1330	6,8572	6,7969	7,1818

Anlage 12 Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den Ratio-Vegetationsindex RVI in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel)
 *-- mosaikiertes Gesamtbild

SDST	Ortholuftbilder														
	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	Gesamt*
0	k.A.	k.A.	3120	3707	3868	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	4583	3881	3897	3730	k.A.	3715
1	2836	3177	3512	4017	3906	4349	4399	2666	2980	3984	3872	4314	4303	4588	3842
2	3439	3651	3334	3660	3915	3878	4251	2906	2986	3729	3815	3913	4049	4407	3670
3	1679	2115	2737	2854	3361	2536	k.A.	1115	1112	1971	2275	k.A.	k.A.	k.A.	2815
4	k.A.	k.A.	2188	2394	3065	2861	3019	k.A.	1233	1605	1761	1848	1879	1893	1626
Gesamt	2274	3255	3213	3559	3797	3666	3924	2594	2764	3706	3619	3879	3951	4234	3498

Anlage 13 Gegenüberstellung des Medians der Grauwertverteilung in den Ortholuftbildern für den NIR-Kanal in Abhängigkeit von den Schadstufen (nur Zentrumspixel)
 *-- mosaikiertes Gesamtbild

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden sind entsprechend gekennzeichnet.

23.04.2006

Datum

eigenhändige Unterschrift.