

**Foto-optische Erfassung der Dimension von
Nadelrundholzabschnitten unter Einsatz
digitaler, bildverarbeitender Methoden**

Inaugural-Dissertation zur
Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Forst- und
Umweltwissenschaften
der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Brsg.

vorgelegt von
Florian Fink

Freiburg im Breisgau
Februar 2004

Dekan: Prof. Dr. Ernst Hildebrand

Referent: Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker

Korreferent: Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter R. Pelz

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2000 bis 2004 am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg unter der Anleitung von Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker. Ihm gilt mein ganz besonderer Dank für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit und die fachlichen Anregungen. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter R. Pelz.

Herrn Prof. Dr. Hans Burkhardt vom Institut für Informatik, Lehrstuhl für Mustererkennung und Bildverarbeitung, der Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg danke ich für die fachlichen Anregungen und die freundliche Unterstützung.

Mein Dank gilt ebenso allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die mir durch ihre Mithilfe in allen Phasen dieser Arbeit stets zur Seite standen.

Herrn Dr. Rüdiger Mutz danke ich für die statistische Beratung und für seine Anregungen. Ebenso danke ich auch Herrn Christian Karsch, Herrn Dr. Claus-Peter Gross, Herrn PD Dr. Thomas Smaltschinski und Herrn Dr. Patrick Reidelstürz für ihre freundliche Unterstützung.

Recht herzlich möchte ich mich auch bei Herrn Bernd Becker bedanken, der tatkräftig in diesem Projekt mitgewirkt und die Daten seiner Diplomarbeit zur Verfügung gestellt hat.

Zum Schluss möchte ich es nicht versäumen, mich bei meinen Freunden ganz herzlich zu bedanken, die mich gerade in der Endphase dieser Arbeit unterstützt haben.

Meinen Eltern gilt mein besonderer Dank.

Das Projekt wurde durch die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg und die Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg finanziert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung	3
2	Stand des Wissens	5
2.1	Holzmesskundliche Zusammenhänge: Stammquerschnitt, Stammform, Holzvolumina	5
2.1.1	Stammquerschnitte	5
2.1.2	Schaft- bzw. Stammform	6
2.1.3	Stammvolumen	7
2.2	Methoden und Verfahren zur Ermittlung von Dimensionsparametern von Rundholz	9
2.2.1	Manuelle Rundholzvermessung	9
2.2.2	Mechanisch-hydraulische Rundholzvermessung bei der maschinellen Aufarbeitung	13
2.2.3	Opto-elektronische Rundholzvermessung	15
2.2.4	Foto-optische Rundholzvermessung	17
2.2.5	Vergleichende Untersuchungen der Rundholzmaße	20
2.2.6	Kontrollmaß	21
3	Material, Methoden und Versuche	23
3.1	Konzept der Untersuchung	23
3.2	Foto-optische Vermessungsverfahren	25
3.2.1	Zweidimensionales Aufnahmeverfahren	25
3.2.1.1	Bildaufnahme	25
3.2.1.2	Bildspeicherung und Bildübertragung	33
3.2.1.3	Bildverarbeitung	33
3.2.1.3.1	Manuelle Bildauswertung	34
3.2.1.3.2	Automatisierte Verfahren	37
3.2.2	Dreidimensionales (stereo-photogrammetrisches) Aufnahmeverfahren	45
3.2.2.1	Bildaufnahme	46
3.2.2.2	Bildverarbeitung	49
3.3	Stirnflächenklassifikation	50
3.3.1	Visuelle Klassifikation der Stirnflächenformen	51
3.3.2	Mathematische Klassifikation der Stirnflächenformen	52
3.4	Stirnflächenoptimierung	54
3.5	Vergleichsmessungen	55
3.5.1	Dimensionsmaßermittlung bei der vollmechanisierten Holzernte mittels Harvester	55

3.5.2	Dimensionsmaßermittlung bei der opto-elektronischen Vermessung am Werkseingang (WEV)	56
3.5.3	Durchmesserermittlung durch manuelle Rundholzvermessung	57
3.6	Versuchsdurchführung	57
3.6.1	Laborversuche	57
3.6.2	Feldversuche	59
3.7	Evaluierung der Ergebnisse der methodischen Voruntersuchungen	62
3.8	Evaluierung der Messergebnisse der Stirnflächen	62
3.9	Evaluierung der aus den Messungen ermittelten Abschnittsvolumina	63
4	Ergebnisse und Diskussion	65
4.1	Methodische Voruntersuchungen	65
4.1.1	Kameravergleich	65
4.1.2	Auswirkungen der Bildvorverarbeitung auf die Ergebnisse der Bildauswertung	66
4.1.3	Präzision und Genauigkeit der Delinierung in den eingesetzten manuellen Bildauswertungsroutinen	67
4.1.4	Automatisierte Delinierungsverfahren	70
4.2	Messergebnisse der Abschnitts Stirnflächen	72
4.2.1	Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)	73
4.2.2	Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – Harvestervermessung (HV)	74
4.2.3	Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – dreidimensional foto-optische (stereo-photogrammetrische) Vermessung (DFV)	76
4.2.4	Diskussion der Stirnflächenmessungen	78
4.2.5	Bildfaktoren	78
4.2.6	Vor- und zurückversetzte räumliche Lage der Abschnitte	80
4.2.7	Stirnflächenform	85
4.2.8	Stirnflächenoptimierung	89
4.3	Ergebnisse der Abschnittsvolumina	92
4.3.1	Vergleich der aus den unterschiedlich gemessenen Dimensionsdaten ermittelten Abschnittsvolumina	94
4.3.1.1	Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)	94
4.3.1.2	Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Harvestervermessung (HV)	97
4.3.2	Vergleich der verkaufsrelevanten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina	98
4.3.2.1	Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)	98

4.3.2.2	Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Klappung (KL)	100
4.4	Diskussion der Abschnittsvolumina	102
4.5	Ergebnisse Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung	106
4.6	Diskussion Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung	108
4.7	Stückzahl	109
5	Abschließende Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick	110
6	Zusammenfassung	121
7	Summary	126
8	Tabellenverzeichnis	130
9	Abbildungsverzeichnis	135
10	Abkürzungsverzeichnis	138
11	Literatur	140
12	Anhang	148
12.1	Verzeichnungsarten in einem Aufnahmesystem	148
12.2	Aktive Konturenmodelle	149
12.3	Kamerakalibrierung	149
12.4	Abbildung von Objekten mit unterschiedlicher Aufnahmeentfernung	150
12.5	Fourierkoeffizienten und Fourierdeskriptoren	150
12.6	Abbildungen und Tabellen	155

1 Einleitung

1.1 Einführung

In Deutschland werden jährlich ca. 43 Mio. m³ Rundholz (davon ca. 70 % zur Schnittholzerzeugung in Sägewerken) eingeschlagen, vermessen, transportiert, gehandelt und verarbeitet (ZMP, 2003). Das Sägerundholz wird in ganzen Stämmen oder auch zunehmend in Form von Stammteilen, in sogenannten Kurzholzabschnitten, ausgehalten und in dieser Form der holzbe- und verarbeitenden Industrie in den Produktionsprozessen zur Verfügung gestellt (EUWID, 2003).

Vermessen und sortiert wird das Rundholz nach dem „Gesetz über gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz“ (HKS) von 1969. Dabei stellt die Holzvermessung eine Voraussetzung für die Sortenbildung von Rundholz dar (GRAMMEL, 1989). Neben der Sortenbildung ist die Rundholzvermessung im Forstbetrieb vor allem zur Verkaufsdatenermittlung notwendig (MAHLER, 1997). Dazu wird das Volumen ganzer Stämme und Stammteile als übliche Handelseinheit des Sägerundholzes ermittelt. Das Volumen (m³ bzw. fm) wird dazu nach der HUBERSchen Formel vereinfachend aus der kreisförmigen Querschnittsfläche in der Mitte des Stammes bzw. des Abschnittes und der Länge des Stammes bzw. des Abschnittes berechnet (PRODAN, 1965; KRAMER UND AKÇA, 1995). Dabei bleibt das Längenübermaß von einem Prozent, das nach der Mittenstärkensortierung auf die Verkaufslänge zu geben ist und eigentlich zum Ausgleich der Schnittfugen am Sägeblock eingeführt wurde (WÖTZEL, 1997), bei der Feststellung der Stamm- bzw. Abschnittsmittle außer Betracht und wird bei der Ermittlung des gehandelten Volumens nicht berücksichtigt.

Neben der Lieferlänge und der Querschnittsfläche in der Mitte der Abschnitte sind im weiteren Bearbeitungsprozess bei der Herstellung von Schnittholz in Sägewerken, insbesondere auch die Durchmesser am starken und am schwachen Abschnittsende (Mindestzopf) von Bedeutung. Die Dimension der Abschnittsenden bestimmt die Dimension des Schnittholzes, das aus den Abschnitten im Rahmen einer optimierten Produktausbeute gewonnen werden kann. Sie sind neben dem Volumen der Stämme und Stammteile eine wichtige Produktionskenngröße für die holzbe- und -verarbeitende Industrie.

Die Ermittlung und Bereitstellung dieser Dimensionsdaten, die Grundlage für den Handel des Rundholzes zwischen holzanbietender und -nachfragender Seite ist, muss für beide Seiten auf einem transparenten Vermessungsverfahren basieren und ein reproduzierbares Ergebnis liefern. Damit besteht von Seiten der Forst- und der Holzwirtschaft das Bedürfnis nach einem präzisen, kostengünstigen Rundholzmaß, in das beide Seiten vertrauen.

Neue Entwicklungen im Bereich der Hard- und Softwaretechnologie zeigen im Vergleich zu traditionellen Verfahrensabläufen ein erhebliches Rationalisierungspotenzial bei vergleichba-

rer Genauigkeit und sollten somit bei der Rundholzvermessung Alternativen zu bisher eingesetzten Verfahren ermöglichen (SCHÖPFER, 1990; WURSTER UND WILWERDING, 1998; KAISER ET AL., 2000).

1.2 Problemstellung

Traditionell werden Dimensionsmerkmale des Rundholzes, wie der Durchmesser, die Länge und die äußere Stammform durch einfache Messverfahren erfasst (GUGLHÖR, 1994; GUGLHÖR ET AL., 1996; FELLER, 1998; KRAFT UND VENUS, 1998) und zumeist zusammen mit einer visuellen Ansprache äußerer Qualitätsmerkmale des Holzes vorgenommen und gespeichert. Bis heute dominiert dabei nach wie vor die forstliche Dimensionsmaßermittlung im Wald durch Handvermessung (Kluppe, Maßband) und die daraus abgeleitete Volumenermittlung. Dies stellt eine erhebliche Arbeits- und Kostenbelastung dar (BML, 1982; GUGLHÖR, 1994). WAGELAAR (1997) beziffert die Kosten für die traditionelle waldseitige Vermessung und Holzaufnahme auf bis zu 15-20 DM/fm (= 7,67 – 10,23 €/fm). Diese zu Beginn der Wertschöpfungskette erhobenen Daten stellen eine wichtige Informationsbasis zur Optimierung des Produktionsprozesses und der Produktgestaltung dar (BECKER, 1997).

An den zahlreichen Waren- und Informationsschnittstellen der „Wertschöpfungskette Wald-Werk“ (Unternehmer, Förster, Transporteur, Sägewerk) werden die erhobenen Dimensions- und Qualitätsdaten des Holzes nur unzureichend weitergegeben. Als Gründe gelten inkompatible Datenermittlungs-, Datenhaltungs- und Datenübergabesysteme zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette (HECKER ET AL., 1998). Da die Stammdaten mehrfach erhoben werden müssen, führt dies zu einer unnötig hohen Kostenbelastung, die es zu eliminieren gilt.

Für Massensortimente wie schwache bis mittelstarke Rundholzabschnitte hat sich daher die Dimensionsermittlung im Rahmen der Freiwerklieferung vom Bestand hin zur holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie verlagert (WURSTER UND WILWERDING, 1998). Die forstseitige Erfassung beschränkt sich dabei auf die Stückzahl der Rundholzabschnitte durch händisches Zählen der abfuhrbereiten Polter im Wald und durch eine stichprobenartige Erfassung der Stärkeverteilung der Abschnitte (MAHLER UND KLEBES, 1990).

Die eigentliche Vermessung des Holzes erfolgt am Werkseingang auf geeichten und forstlich sortierüberprüften Vermessungsanlagen. Als Ergebnis werden die Gesamtstückzahl der Rundholzabschnitte je gelieferter Fuhre und einzelabschnittsweise Durchmesser, Länge und Volumen ermittelt. Eine Überprüfung durch Vergleich der von der Forstseite bereitgestellten Holzmenge mit der von der holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie registrierten Menge zeigt immer wieder Abweichungen hinsichtlich der Stückzahl, der Länge und der Durchmesser- und Volumenverteilung der Rundholzabschnitte sowie des daraus berechneten Volumens

(KRAFT UND VENUS, 1998). Als Abrechnungsmaß verwendet, stößt die Werkeingangsvermessung deshalb auf vielfältige Vorbehalte und führt zwischen holzanbietender, -transportierender und -nachfragender Seite zu Störungen der Geschäftsbeziehungen und Vertrauensverlusten (MAHLER UND KLEBES, 1990; KRAFT UND VENUS, 1998).

Im Rahmen der Bereitstellungskette ergibt sich daher für den Lieferanten wie auch für den Verarbeiter die Notwendigkeit eines kostengünstigen und hinreichend genauen Verfahrens zur Erfassung der Stückzahl, der Durchmesser- und des Volumens der Rundholzabschnitte. Ein solches Verfahren muss auch zweifelsfrei Vermischungen und Verwechslungen von zur Abfuhr bereitgestellten Holzmengen, die besonders bei massivem Holzanfall nach Sturmkatastrophen auftreten, ausschließen bzw. in der Lage sein, diese aufzudecken. Zugleich wächst angesichts neuer Rohholzlogistikkonzepte (HECKER ET AL., 1998) das Bedürfnis, für Dispositionszwecke rasch und möglichst mit mobilen Geräten an den verschiedenen Schnittstellen der Lieferkette einen Überblick über Holzmengen, Holzdimensionen und Holzqualitäten z.B. für die Transport- und Mengenplanung in der holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie zu erlangen.

1.3 Zielsetzung

Im Hinblick auf die beschriebenen Probleme bei der Vermessung von Rundholzabschnitten und den Anforderungen neuer Logistikkonzepte ist das Hauptziel dieser Arbeit, alternative Möglichkeiten der Erfassung und Dokumentation von Dimensionsmerkmalen von Rundholzabschnitten unter Einsatz innovativer Hard- und Softwaretechnologie zu entwickeln, die ergänzend zur heute üblichen Holzvermessung im Wald bzw. im Werk eingesetzt werden können.

Berührungslos arbeitende Aufnahmeverfahren zur Rundholzvermessung scheinen besonders personal-, zeit- und somit kostengünstig (CORREIA ET AL., 1993). Zu den berührungslos arbeitenden Aufnahmeverfahren zählen neben lasergestützten Systemen auch foto-optische, bildgebende Aufnahmeverfahren. Im Zusammenhang mit dem möglichen Einsatz foto-optischer, bildgebender, digitaler Aufnahmeverfahren in Kombination mit computergestützten Verarbeitungs- und Auswertungsverfahren werden folgende Teilziele bzw. Fragestellungen für diese Untersuchung formuliert:

- Ist eine Ermittlung produkt- und produktionsrelevanter Dimensionsmerkmale mit foto-optischen, bildgebenden Aufnahmeverfahren in Kombination mit computergestützten Auswertungsverfahren technisch möglich?
- Lassen sich anhand einer Aufnahme von einer üblichen Lager- oder Transporteinheit von Rundholzabschnitten, wie sie an der Waldstraße als Polter oder auf einem Lkw

als Holzladung gegeben sind, die Stückzahl, die Durchmesser- und die Volumina der einzelnen, in dieser Erfassungseinheit enthaltenen Abschnitte sowie das Gesamtvolumen der Polter bzw. Ladungen ermitteln?

- Erreicht das entwickelte Verfahren eine Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit, die sowohl von der holzanbietenden als auch -nachfragenden Seite akzeptiert wird?
Nur eine beidseitige Akzeptanz ermöglicht einen Einsatz des Verfahrens als Kontroll- und Dokumentationsmaß.
- Unter welchen zusätzlichen Voraussetzungen (Verfahrensmodifikationen und Softwareentwicklungen) ist eine praxistaugliche Konfiguration eines foto-optischen Vermessungsverfahrens möglich?

2 Stand des Wissens

2.1 Holzmesskundliche Zusammenhänge: Stammquerschnitt, Stammform, Holzvolumina

Die Berechnung des Volumens eines Stammes erfolgt üblicherweise über seine Länge und anhand von Stammquerschnittsflächen entlang der Stammlängsachse, wobei eine Vielzahl geometrischer Flächen- und Rotationskörpermodellen zur Anwendung kommen. Diese geometrischen Modelle vereinfachen die Berechnung des Stammvolumens. In der forstlichen Praxis wird bei der Vermessung von Stammholz zur Querschnittsflächenberechnung in der Mitte des Stammes ein Kreismodell eingesetzt (PRODAN, 1965; BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT, 1969). In der holzverarbeitenden Industrie kommen zunehmend differenziertere geometrische Modelle zur einzelstammweisen Ausbeuteoptimierung des Rundholzes zur Anwendung (SKATTER UND HØIBØ, 1998).

2.1.1 Stammquerschnitte

Stammquerschnitte weichen in der Regel von der Kreisform ab (MÜLLER, 1957b; MATERN, 1958; ASSMANN, 1961; PRODAN, 1965; SMALTSCHINSKI, 1986; MATERN, 1990; KRAMER UND AKÇA, 1995). ASSMANN (1961) nennt die Bildung von Druckholz bei Nadelholz, den Einfluss des Wurzelanlaufs und der Äste und die Einwirkung äußerer Faktoren (Hangneigung, Licht- und Kronenverhältnisse) als Ursache für exzentrische Schaftquerschnitte. MÜLLER (1957b) beschreibt die Abhängigkeit der Querschnittsform von der Biegebeanspruchung der Bäume. Die Abweichungen der Schaftquerschnitte von der Kreisform werden mit verschiedenen Ansätzen quantifiziert: Die Unrundheit oder Ovalität von Schaftquerschnittsflächen wird von WILLIAMSON (1975) und SKATTER ET AL. (1998) über das Verhältnis von mindestens zwei Durchmessern einer Querschnittsfläche oder anhand von Exzentrizitätsfaktoren beschrieben. In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zu den Modellen, die die Schaftquerschnittsform beschreiben.

Modellhaft wird die Form der Schaftquerschnitte von TIRÉN (1929) in der Regel als Kombination aus Kreisen mit Ellipsen beschrieben. Nach TISCHENDORFF (1927) zeigt die Ellipse eine gute Approximation an die Realfläche. Auch KRAMER UND AKÇA (1995) beschreiben die Schaftquerschnitte als „[...] Ellipse oder Eiform, deren größter Durchmesser in Hauptwindrichtung und/oder in Hangrichtung liegt.“. Nach MÜLLER (1957b) weist die Querschnittsfläche von Baumschäften in Brusthöhe hingegen unregelmäßige Formen auf, die zumeist nicht durch elliptische oder ovale Formen nachgebildet werden können. Auch KÄRKKAINEN (1975) zeigt an seinem Untersuchungsmaterial, dass die durchschnittliche Querschnittsfläche keine

elliptische Form einnimmt. MATERN (1990) hält die Ellipse nicht für ein geeignetes Modell, um die Schaftquerschnittsform zu beschreiben.

Je nach Wahl der zu erhebenden Durchmesser der Querschnittsfläche und des Schaftquerschnittmodells nähern sich die Modellflächen den realen Querschnittsflächen an. Das heißt, dass die Über- und Unterschätzungen der realen Flächen gegenüber den Modellflächen kleiner werden.

Dabei tendieren vor allem Ellipsenmodelle zur Überschätzung der wahren Querschnittsfläche (MONGEAU ET AL., 1993). SKATTER und HØIBØ (1998) vergleichen deshalb ein Kreis- (3 Eingangsvariablen), ein Ellipsen- (5 Eingangsvariablen) und ein Fourier-Koeffizienten-Modell (variable Eingangsvariablenanzahl) zur Berechnung von Querschnittsflächen von *Pinus sylvestris* und *Picea abies*. Bei gleicher Variablenanzahl wie bei den ersten beiden Modellen erreicht das Fourier-Koeffizienten-Modell ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Querschnittsfläche, bei Erhöhung der Eingangsvariablen kann die Form der Querschnittsfläche sehr genau nachgezeichnet und somit die Fläche exakt errechnet werden.

MATERN (1958) berechnet Querschnittsflächen anhand verschiedener Durchmesser eines Querschnitts und vergleicht die errechneten Flächen mit konvexen Flächen, die aus Stützfunktionen hergeleitet wurden. Es zeigt sich, dass die Querschnittsflächen, die aus in zufälligen Richtungen erhobenen Durchmessern berechnet wurden, geringere, zumeist positive Abweichungen zu den konvexen Gebilden zeigen als die aus den maximalen und minimalen Durchmessern ermittelten Flächen.

MATERN (1958) schlägt für eine verzerrungsfreie Schätzung der Querschnittsfläche Radienmessungen von einem fixen Querschnittsflächenpunkt nach folgender Formel vor:

$$F = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} r^2(v) dv \quad (1)$$

wobei gilt: F = Querschnittsfläche und r = Radius der Querschnittsfläche.

2.1.2 Schaft- bzw. Stammform

Die Schaft- bzw. Stammform eines Baumes lässt sich durch die Schaftkurve, die die äußere Begrenzungskurve eines Stammes darstellt, beschreiben. Sie zeigt in der Regel einen typischen Verlauf, der je nach Baumart variiert und von weiteren Faktoren, wie dem Standort, der sozialen Stellung des Baumes im Bestand und dem Schlussgrad beeinflusst wird (PRODAN, 1965; KRAMER UND AKÇA, 1995). Bei einer im Bestandesschluss erwachsenen Fichte wird nach ASSMANN (1961) und KRAMER UND AKÇA (1995) die Schaftkurve idealtypisch im Wurzelanlaufbereich vom Boden bis 1/10 der Baumlänge konvex, im anschließenden

Mittelschaftbereich bis zum Kronenansatz konkav und von dort bis zur Baumspitze im Oberschaftbereich geradlinig verlaufen. Werden aus den beschriebenen Schaftkurventeilen Rotationskörper konstruiert, die um die Längsachse des Baumes rotieren, so entsteht im Stammfußbereich ein Neiloid-Stumpf, im Mittelschaftbereich ein Stumpf eines kubischen bis quadratischen Paraboloids und im Oberschaftbereich ein quadratisches Paraboloid mit Übergängen zum geradseitigem Kegel (ASSMANN, 1961; PRODAN, 1965; KRAMER UND AKÇA, 1995). Über die Durchmesser und deren Abnahme mit zunehmender Baumhöhe oder auch Stammlänge kann die Schaft- bzw. Stammform eindeutig beschrieben werden. Dazu können Ausbauchungsfunktionen eingesetzt werden, die baumartenspezifisch die Verhältnisse zwischen Durchmessern in verschiedenen Höhen zu einem Bezugsdurchmesser angeben (KRAMER UND AKÇA, 1995). Neben Ausbauchungsfunktionen können zur Beschreibung der Schaftform eine Vielzahl mathematischer Funktionen genutzt werden, wie dies HRADETZKY (1981), MAYER (1983), SMALTSCHINSKI (1983) und KLEINN (1989) mit Hilfe von Spline-Funktionen zeigen. Auch die Formzahlen, die als Reduktionsfaktoren zur Bestimmung des Stammvolumens anhand einer Bezugswalze eingesetzt werden, geben Auskunft über die Stammform (PRODAN, 1965).

2.1.3 Stammvolumen

Das Volumen eines Stammes kann aus einer oder mehreren Querschnittsflächen des Stammes und seiner Länge berechnet werden. Abhängig von der Wahl der Querschnittsfläche(n) und deren Gewichtung werden neben der HUBERSchen Formel, die bei der Volumenbestimmung des liegenden Holzes in der Forstlichen Praxis genutzt wird, die Formeln nach SMALIAN und NEWTON zur Stammvolumenberechnung eingesetzt (KRAMER UND AKÇA, 1995).

$$\text{HUBERSche Formel} \quad v = g_m \times l \quad (2) \quad \text{mit:}$$

v = Volumen des Stammes

$$\text{SMALIANSche Formel} \quad v = \frac{g_u + g_o}{2} \times l \quad (3)$$

l = Länge des Stammes

g_m = Grundfläche in der Mitte des Stammes

g_u = untere Grundfläche

$$\text{NEWTONSche Formel} \quad v = \frac{g_u + 4g_m + g_o}{6} \times l \quad (4) \quad g_o = \text{obere Grundfläche}$$

Für die zuvor beschriebenen Rotationskörper, mit denen der Schaft idealtypisch in verschiedenen Baumhöhen abgebildet wird, errechnet sich nach der HUBERSchen Formel nur für den Zylinder, das quadratische Paraboloid und den Paraboloid-Stumpf das exakte Volumen. Für den Kegel und den Neiloid-Stumpf ergeben sich nach der HUBERSchen Formel Unterschätz-

zungen, für die SMALIANSche Formel Überschätzungen des Volumens (ORMEROD, 1985; KRAMER UND AKÇA, 1995). Die Formel nach NEWTON ergibt auch für den Neiloid-Stumpf gute Ergebnisse. Nach WAGNER ET AL. (1976) können die HUBERSche oder die SMALIANSche Formel für Stämme mit annähernd Zylinder- oder Paraboloidform eingesetzt werden. Es zeigen sich jedoch nach KRAMER UND AKÇA (1995) Schwierigkeiten und Fehler beim Ermitteln der unteren Querschnittsfläche eines Stammes aufgrund seines Wurzelanlaufs.

Die Fehler, die sich bei der HUBERSchen Formel (Mittenflächenformel) ergeben und sich somit auf die Stammvolumenberechnung auswirken, sind – wie zuvor beschrieben – stammformabhängig und werden Formfehler genannt (KORSUN, 1934 zitiert nach PRODAN, 1965).

Der Formfehler beträgt bei Stammabschnitten in Abhängigkeit von der Lage der Abschnitte am Stamm für den unteren Abschnitt – 5 % bis – 10 %, maximal bis – 25 % und für den anschließenden Stammabschnitt ± 2 % der Masse (PRODAN, 1965). BRUCE (1982) rät deshalb, neben dem Durchmesser in der Mitte des Stammes die Durchmesser der beiden Stirnseiten aufzunehmen, um bei der Berechnung des Erdstammvolumens genauere Ergebnisse zu erzielen. Für die Stammabschnitte aus dem oberen Stammbereich schlägt er vor, die HUBERSche oder SMALIANSche Formel einzusetzen. ORMOND (1985) hält den Einsatz der BEHRschen Formel für Erdstammstücke und die NEWTONSche Formel für Stammabschnitte aus dem oberen Stammbereich für die genauesten Volumenschätzer. Mit der SMALIANSchen Formel werde das Stammvolumen des Erdstammstücks überschätzt.

Anhand der Querschnittsfläche und der Länge des Stammes wird mit Hilfe der Formzahl der Inhalt einer Bezugswalze auf das tatsächliche Volumen des Stammes reduziert (ALTHERR, 1963; KRAMER UND AKÇA, 1995). Für Formzahlen $f_{0,1h}$ kleiner als 0,52 wird das wahre Volumen des Stammes unter-, für $f_{0,1h}$ größer als 0,55 überschätzt (ANONYMUS, 2002). Zur Massenermittlung liegender Bäume für wissenschaftliche Zwecke empfehlen KRAMER UND AKÇA (1995) eine sektionsweise Kubierung mit Bildung absoluter Sektionen. Dabei wird das Gesamtvolumen des Stammes aus den einzelnen Sektionsvolumina, die nach der HUBERSchen Formel berechnet werden, ermittelt.

Festzuhalten ist, dass trotz einer Vielzahl von Ansätzen keine exakte analytische Formel für die Berechnung von Stammquerschnitten und -schafformen existiert.

2.2 Methoden und Verfahren zur Ermittlung von Dimensionsparametern von Rundholz

Die Vermessung von Rundholz (Stämmen und Stammabschnitten) ist in der forstlichen Praxis erforderlich für die Sortenaushaltung, die Verkaufsdatenermittlung, die Waldarbeiterentlohnung, die Unternehmerabrechnung, die naturale und kaufmännische Holzmassenbuchführung, die Kennzifferableitung und die Produktionsplanung (MAHLER, 1997). In der holzverarbeitenden Industrie dient der Vermessungsvorgang der Kaufpreisermittlung, der innerbetrieblichen Sortierung und der Ausbeuteoptimierung (WURSTER UND WILWERDING, 1998).

Die Dimension des Rundholzes wird dort heute überwiegend stationär mit Hilfe einer mechanisierten Rundholzvermessung, insbesondere mit opto-elektronischen Vermessungstechnologien, ermittelt. Waldseitig kommt hingegen das traditionelle, manuelle Rundholzvermessungsverfahren zum Einsatz und zunehmend auch mechanisch-hydraulische Vermessungstechnologien der Vollernter (WÖTZEL, 1997).

2.2.1 Manuelle Rundholzvermessung

Zu den Verfahren der manuellen Rundholzvermessung zählen die Vollaufnahme, die Stichprobenverfahren und die Raummaßermittlung. Bei den Stichprobenverfahren werden die Freie Stichprobe, die Lagenweise Mantelmessung und die Linienstichproben unterschieden (GUGLHÖR ET AL., 1996; FELLER, 1998; KRAFT UND VENUS, 1998). Für wissenschaftliche Untersuchungen werden zumeist neben dem Durchmesser, der in der Vollaufnahme erhoben wird, weitere Stammdurchmesser entlang der Stammachse erhoben.

Vollaufnahme

Das konventionelle forstliche Verfahren zur Rundholzvermessung stellt die Vollaufnahme von Langholz dar. Dabei werden der Mittendurchmesser, die Länge und die Qualität des Stammes erhoben und auf dem Stamm dauerhaft markiert. Die Stämme werden traditionell mit Kluppe und Stahlmaßband vermessen (KRAMER UND AKÇA, 1995). Die Vollaufnahme wird überwiegend am Hiebsort durchgeführt, da nach der Polterung der Stämme die Möglichkeiten zur Mittendurchmesserermittlung eingeschränkt sind. Aus den erhobenen Dimensionsdaten können HKS-konform die zugehörigen Stammvolumina errechnet werden.

Aus Kostengründen ist der Einsatz dieses Vermessungsverfahrens – vor allem für geringwertige Massensortimente – zugunsten von Stichprobenverfahren oder mechanisierten Vermessungsverfahren rückläufig (BML, 1982; GUGLHÖR, 1994; WAGELAAR, 1997). Die Kosten für die traditionelle waldseitige Vermessung und Holzaufnahme beziffert WAGELAAR (1997)

auf 15-20 DM/fm (= 7,67-10,23 €/fm), GUGLHÖR (1994) nennt Kosten von bis zu 15 DM/fm (= 7,67 €/fm).

Stichprobenverfahren

Stichprobenverfahren werden zur Vermessung von Massensortimenten, wie Industrieholz oder schwachem Stammholz in Fixlängen, eingesetzt, um den hohen Vermessungsaufwand und den damit verbundenen Kosten für diese geringerwertigen, meist homogenen Sortimente zu reduzieren (BML, 1982; GUGLHÖR, 1994; GUGLHÖR ET AL., 1996; WILWERDING UND GROß, 1996; FELLER, 1998; KRAFT UND VENUS, 1998; SCHWEDISCHER RAT FÜR HOLZVERMESSUNG, 1999). Der Einsatz von Stichprobenverfahren zur Rundholzvermessung wird unter anderem aufgrund der Repräsentanz, Genauigkeit, Manipulier- und Reproduzierbarkeit der Verfahren (FELLER, 1998) kontrovers diskutiert. PELZ (1980) beschreibt ein in den USA eingesetztes Stichprobenverfahren (APS Methode), das unter anderem zur Massenermittlung liegenden Holzes angewendet wird. Dabei wird die Größe aller Individuen (z.B. Volumina der Stämme) geschätzt und aufgrund der geschätzten Größe wird entschieden, ob das Individuum genau vermessen wird.

Freie Stichprobe

In der Freien Stichprobe werden die Mittendurchmesser der Stammabschnitte wie in der Vollaufnahme erhoben, jedoch nur mindestens 10 % der Stückzahl in einer zufälligen Stichprobe erfasst (GUGLHÖR ET AL., 1996). Nach der Polterung wird die Gesamtstückzahl an der Waldstraße ermittelt (KRAFT UND VENUS, 1998). Mit Hilfe der gemessenen Durchmesser, der Länge der Abschnitte und der Gesamtstückzahl kann das Volumen des Hiebes hergeleitet werden. Die HKS-Konformität wird kontrovers diskutiert (GUGLHÖR ET AL., 1996; KRAFT UND VENUS, 1998). Problematisch erscheint eine repräsentative Aufnahme in „Katastrophenhieben“ aufgrund der schlechten Zugänglichkeit des Holzes (LWF, 1993) und das kleine Zeitfenster zwischen Fällung und Rücken des Holzes, in dem das Holz vermessen werden muss. FELLER (1998) gibt Vermessungskosten von ca. 2 DM/fm (=1,02 €/fm) an.

Lagenweise Mantelmessung

Im Verfahren der Lagenweisen Mantelmessung werden während des Rückens zugängliche Abschnitte des Polters vermessen. Im Mantel des Polters, den die oberste Lage der Abschnitte im Polter bildet, kann der Mittendurchmesser der Abschnitte erhoben werden (GUGLHÖR ET AL., 1996). Die Gesamtstückzahl der Abschnitte wird wie bei der Freien Stichprobe am Polter ermittelt. Bei diesem Verfahren besteht die Tendenz, anhand der Stichprobe die Stärkeklassenverteilung des Gesamtkollektivs zur Seite der stärkeren Durchmesser zu

verschieben, da Abschnitte mit schwächeren Durchmessern in den Poltermantel einsinken und seltener gemessen werden können (GUGLHÖR ET AL., 1996; KRAFT UND VENUS, 1998). Die geforderte Genauigkeit von $\pm 5\%$ erfüllt die Lagenweise Mantelmessung nur eingeschränkt. FELLER (1998) beschreibt für dieses Verfahren an 10 Holzlosen (1350 fm o. R., Kiefer und Fichte) gegenüber einer Vollaufnahme ein im Mittel um 4,5 % höheres Volumen bei einer Streuung um 7,8 %. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen BECKER und RAUPACH (1990). FELLER (1998) gibt Vermessungskosten von 1,20 DM/fm (=0,61 €/fm) an.

Linienstichproben

Die Linienstichprobenverfahren sehen eine Vermessung der Stirnflächendurchmesser der Stammabschnitte an Vorder- und Rückseite der Polter an der Waldstraße vor.

Entlang von in regelmäßigen Abständen angebrachten, senkrechten Markierungslinien an beiden Polterseiten werden die Durchmesser der Abschnitte vermessen, die von den Markierungslinien geschnitten werden. Aus den forstüblich erhobenen Durchmessern werden getrennt nach Poltervorder- und Polterrückseite mittlere Durchmesser ermittelt, aus denen wiederum ein durchschnittlicher Abschnittsdurchmesser je Polter hergeleitet wird (BORT ET AL., 1989; GUGLHÖR ET AL., 1996). Anhand der Abschnittsstückzahl des Polters, des ermittelten mittleren Durchmessers und der Länge der Abschnitte wird das Volumen des Polters errechnet. Erdstammstücke, die wegen der Wurzelanläufe zumeist über eine stark vergrößerte Abschnittsstirnfläche verfügen, werden beim „Freiburger Verfahren“ (BORT UND MAHLER, 1990) im Gegensatz zur „Modifizierten Linienstichprobe Stirnfläche“ (MLS-Verfahren) (GUGLHÖR ET AL., 1996) nicht aufgenommen. Nach KRAFT UND VENUS (1998) werden bei dieser Art der Stichprobenverfahren einzelne Stärkeklassen überrepräsentiert. FELLER (1998) zeigt an 10 Holzlosen (1350 fm o. R., Kiefer und Fichte) für das herkömmliche Stichprobenverfahren gegenüber der Vollaufnahme einen um 0,4 % niedriger liegenden Mittelwert bei einer Streuung von 5,5 %. Für das modifizierte Verfahren errechnet er einen um 0,1 % niedriger liegenden Mittelwert bei einer Streuung von 4,2 %. Für die Stichprobenverfahren liegen die Vermessungskosten bei ca. 1,20-1,25 DM/fm (=0,61-0,64 €/fm) (FELLER, 1998).

Raummaß

Das Raummaß wird an der Aufnahmeeinheit Polter über die Polterlänge, Poltertiefe und durchschnittliche Polterhöhe als Brutto Raummaß (in Rm m. R.) ermittelt. Es wird zumeist für Industrieholz, zunehmend aber auch für mechanisiert bereitgestelltes Sägeholz in Standardlängen eingesetzt (WILWERDING UND GROß, 1996). Über baumarten- und längenspezifische Umrechnungsfaktoren besteht die Möglichkeit, ein Festmaß in fm o. R. über das Raummaß

herzuleiten. Die Gesamtstückzahl der Abschnitte im Polter kann zusätzlich am Polter erhoben werden, um einen Volumenmittelstamm zu ermitteln (WILWERDING UND GROß, 1996). Problematisch erscheinen bei dem Raummaßverfahren die fehlende Stärkeklassenverteilung und die Bestimmung des Umrechnungsfaktors (KRAFT UND VENUS, 1998).

Die Vermessungskosten für das von ihnen beschriebene Raummaßverfahren werden von WILWERDING UND GROß (1996) in Abhängigkeit von der Polterzahl, Poltergröße, Gesamtlosgröße und Sortenlänge im 2-Mann-Verfahren auf 0,50-1,00 DM/fm (=0,26-0,51 €/fm) beziffert. Durch die Stückzählung der Abschnitte fallen zusätzliche Kosten von 0,10-0,20 DM/fm (=0,05-0,10 €/fm) an. KRAFT UND VENUS (1998) geben für die Vermessung Kosten von 0,70 DM/fm (=0,36 €/fm) an.

Manuelle Rundholzvermessung in wissenschaftlichen Untersuchungen

In wissenschaftlichen Untersuchungen, in denen die präzise Vermessung der Querschnittsflächen bzw. des Volumens im Mittelpunkt steht, kommen neben der Kluppe auch Radienmessungen und Umfangmessungen an der Querschnittsfläche zum Einsatz (TIREN, 1929; MÜLLER, 1957a; KENNEL, 1959; MATERN, 1990; SKATTER, 1998). Dabei werden unterschiedliche Flächenermittlungsverfahren genutzt, um geeignete Modelle zur Nachbildung von unrunder Querschnittsflächen (vgl. Kapitel 2.1) aufzustellen. Die Eignung der Modelle zur Nachbildung der Querschnittsfläche definiert sich über einen minimierten Unterschied zwischen der anhand des Modells nachgezeichneten Querschnittsfläche und der realen Querschnittsfläche. Zudem werden die Fehler betrachtet, die sich bei der Vermessung der Durchmesser aus den Messverfahren selbst ergeben.

Die Fehler, die beim Vermessen von Stammdurchmessern mit der Kluppe entstehen, beschreiben TIREN (1929), PRODAN (1965) und KRAMER UND AKÇA (1995). Üblicherweise wird zwischen einem systematischen und einem zufälligen Messfehler unterschieden. Der systematische wird oftmals durch eine fehlerhafte Konstruktion der Kluppe oder durch eine falsche Meßmethode hervorgerufen. Der zufällige Messfehler ergibt sich durch Ansetzen der Kluppen an falschen Messstellen, durch Verkanten der Kluppen oder durch zu starkes Andrücken der Kluppschenkel (TIREN, 1929; SCHMID-HASS ET AL., 1980; KRAMER UND AKÇA, 1995).

Für ein aus fehlerhaft ermittelten Durchmessern errechnetes Volumen ergibt sich nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung folgender Fehler (SCHMID-HASS ET AL., 1980): „Der Schätzfehler ΔV für das Volumen V eines Stammstückes ergibt sich aus den Fehlern ΔD der Durchmesserermessung und der ΔL der Längenmessung [...]“:

$$\Delta V \sim \frac{\partial V}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial V}{\partial L} \Delta L \quad (5)$$

Es zeigt sich bei einem relativen Durchmesserfehler von p % ein relativer Volumenfehler von $2p$ % (SCHMID-HASS ET AL., 1980; KRAMER UND AKÇA, 1995).

Bei der Längenmessung vermindert der Gebrauch von Stahlmessbändern und geeichten Meßlatten mögliche Gerätefehler (KRAMER UND AKÇA, 1995). Der systematische Fehler, der sich durch die Längenmessung der Stammoberfläche und nicht der Stammachse ergibt, wird mit ca. 0,001 % beziffert.

Ein weiterer systematischer Flächenfehler entsteht beim Messen von unrunder Stammquerschnitten mit Kluppe oder Maßband. Beide Geräte sind ungeeignet, die geometrische Form des Querschnitts zu ermitteln (SMALTSCHINSKI, 1998). Wird bei einem ovalen Baumquerschnitt der Durchmesser mit einem Maßband ermittelt, entspricht das Ergebnis dem arithmetischen Mittel aller möglichen Kluppungen des Querschnitts (MATERN, 1958). Der Fehler, der „Beim Einsetzen dieses Durchmessers in die Kreisformel entsteht [ist] ein positiver Fehler.“ SMALTSCHINSKI (1998). Dieser Fehler kann mit einem elastischen, kreisförmigen Ring, der um die Querschnittsfläche gespannt wird, veranschaulicht werden. Eine Verformung – z.B. ein Zusammendrücken dieses Rings – führt zu einer Verkleinerung der Querschnittsfläche bei gleich bleibendem Umfang (SMALTSCHINSKI, 1986 UND 1998). Mit Ausnahme der kreisförmigen Querschnittsfläche zeigt sich mit dem Einsatz der Kreisflächenformel generell eine Überschätzung des wahren Querschnittsfläche (SMALTSCHINSKI, 1986).

Dieser Fehler wird interperimetrisches Defizit genannt. Der zweite mögliche Fehler entsteht bei der Umfangmessung durch einen welligen Verlauf des Baumquerschnitts, da nur die konvexe Form des Querschnitts erfasst wird. Er wird folgerichtig konvexes Defizit genannt.

Auch MATERN (1990) untersucht das konvexe Defizit an Fichten- und Kiefernquerschnittsflächen in und ohne Rinde. Er vergleicht die mit 36 Radien ermittelte „wahre“ Fläche und die Fläche, die sich aus der konvexen Umschließung der Querschnittsfläche ergibt. Diese konvex-ingeschlossene Fläche ergibt sich, wenn ein dünnes Gummiband um die Querschnittsfläche gespannt wird. MATERN (1990) findet kaum konvexe Formen der Querschnittsflächen. Er errechnet ein durchschnittliches konvexes Defizit am Stammfuß von knapp über 1 %.

2.2.2 Mechanisch-hydraulische Rundholzvermessung bei der maschinellen Aufarbeitung

Die mechanisch-hydraulische Rundholzvermessung mittels Vollerntern (Harvestern) hat im letzten Jahrzehnt aufgrund der hohen Arbeitsproduktivität und technischen Entwicklung der Maschinen stark an Bedeutung gewonnen (WAGELAAR, 1997). Vor allem für schwache bis mittelstarke Sortimenten ergibt sich wegen der hohen Kosten der traditionellen waldseitigen

Vermessung ein zusätzlicher Rationalisierungsdruck zur automatisierten Vermessung dieser Sortimente.

Bei Beurteilung der Harvestervermessung muss zwischen der Messwerterhebung und der Messwertverarbeitung unterschieden werden.

Messwerterhebung

Nach dem Fällschnitt werden die Durchmesser des Stammes über die Stellung der Entastungsmesser (BERGMANN, 1997) oder der Vorschubwalzen mittels Drehpotentiometer, die im Harvesteraggregat angebracht sind, gemessen. Die Durchmesserernahme erfolgt mindestens jeden Zentimeter auf ganze Millimeter bei einer Messauflösung kleiner als zwei Millimeter (DIETZ UND HAUCK, 1997). Die Durchmesser werden konventionsgemäß in Rinde ermittelt, obwohl die Stammabschnitte durch die Entastungsmesser je nach Baumart und Zustand des Holzes (teil-)entrindet sein können (DIETZ UND HAUCK, 1997).

Die Länge des Stammabschnittes wird über ein Messrad mit Drehimpulsgeber auf Zentimeter genau gemessen (BECKER ET AL., 1999). Die geforderte Messauflösung liegt nach DIETZ UND HAUCK (1997) unter zehn Millimetern.

Bei der Harvestervermessung der Länge und der Durchmesser eines Stammes sind die technisch mögliche Genauigkeit des Systems und die Messgenauigkeit im Praxiseinsatz zu unterscheiden (WAGELAAR, 1997). Im Praxiseinsatz wird die Messgenauigkeit durch hohe mechanische Belastungen und arbeitsspezifische Umgebungseinflüsse wie Temperatur, Witterung und Hiebsbedingungen beeinflusst (DIETZ UND HAUCK, 1997; GRUßDORF, 1997b; WAGELAAR, 1997; ZIMMERMANN, 1997). Diese Einwirkungsfaktoren erfordern eine Kalibrierung des Systems vor Ort, um eine kontinuierliche Messgenauigkeit gewährleisten zu können. Aufgrund dieser notwendigen ständigen Manipulierbarkeit der Messeinrichtung ist allerdings eine Eichung ausgeschlossen.

Messwertverarbeitung

Die Rundholzvolumenberechnung erfolgt sektionsweise aus maximal 25 cm langen Sektionen oder HKS-konform aus dem Stammdurchmesser in der Mitte der Verkaufslänge (DREEKE, 1997; WAGELAAR, 1997). Die in der HKS geforderte kreuzweise Durchmesserermessung des Stammes wird mit Hilfe einer Dreiecksvermessung, die durch die Bauweise des Harvesteraggregats vorgegeben ist, angenähert. Dabei kann mit Hilfe von Rindenabzugsfunktionen, die im Daten verarbeitenden System hinterlegt sind, ein pauschaler Rindenabzug durch einen baumarten- und stärkeklassenspezifischen Rindenabzug ersetzt werden (WÖTZEL, 1997). Die mittels Harvesteraggregat gemessenen Längen- und Durchmesserwerte werden im ASCII-Format, strukturiert nach einem skandinavischen Standard für forstliche Datenver-

arbeitung und –übertragung (StanForD), in einer Kopfsatzdatei und einer Stammdatei abgelegt. Die Kopfsatzdatei enthält Informationen über den Hieb, die Stammdatei Daten über das aufgearbeitete Holz (DIETZ UND HAUCK, 1997).

2.2.3 Opto-elektronische Rundholzvermessung

Opto-elektronische Rundholzvermessungsverfahren werden in Sägewerken sowohl zur Einteilung des angelieferten Langholzes in Abschnitte als auch zur Sortierung der Abschnitte nach Länge, Zopfdurchmesser und Qualität eingesetzt. Zunehmend werden diese Rundholzvermessungsverfahren auch zur Kaufpreisermittlung des gelieferten Holzes eingesetzt (Werkeingangsvermessung). Die erhobenen Daten werden außerdem zur innerbetrieblichen Ausbeuteoptimierung verwendet.

Messwerterhebung

Bei diesem berührungslos arbeitenden, elektronischen Vermessungsverfahren erfolgt die Längenmessung der Stämme im Längsdurchgang über eine Fördereinrichtung mittels Impulsgeber. Die im gemeinsamen Anforderungskatalog des Deutschen Forstwirtschaftsrates und der Vereinigung Deutscher Sägewerksverbände erlaubte Fehlergrenze bei der Längenermittlung der Stämme beträgt $\pm 0,4\%$ für den arithmetischen Mittelwert aus 10 bis 20 Messungen (DFWR/VDS, 1994). Die Messauflösung beträgt bei der Längenermittlung ≤ 1 cm.

Vor allem die Verfahren zur Durchmesserermittlung unterlagen in der Vergangenheit einer starken technologischen Weiterentwicklung. Prinzipiell erfolgt sie optisch mit zwei Lichtvorhängen, die im Winkel von 90° zueinander angeordnet sind. Das System zur Durchmessererfassung besteht aus einem Sender und einem Empfänger (Phototransistoren), durch das die Stämme transportiert werden (MAHLER UND KLEBES, 1990). Beim Transport der Stämme entlang ihrer Längsachse erzeugen sie ein Schattenbild auf den Phototransistoren, mit dem ein entsprechendes Signal und damit ein Durchmesserwert errechnet wird. Die erlaubte Fehlergrenze bei der Durchmesserermittlung der Stämme beträgt $\pm 1,5$ mm für den arithmetischen Mittelwert aus mindestens 100 Einzelmessungen (DFWR/VDS, 1994). Die Messsektionen für die Durchmesserermittlung sind ≤ 25 cm lang.

Zunehmend werden auch neue Technologien wie das Laserscanning der Stämme bei der Rundholzvermessung eingesetzt (BLAIS UND LECAVALIER, 1995; JÖRG ELEKTRONIK, 2003; MICROTEC, 2003). Dabei kommen bei einigen Produkten mehrere Laser-Lichtquellen zum Einsatz, die in Kombination mit CCD-Kameras und Parallelschanner eine dreidimensionale

Stammkonturerfassung im Längsdurchlauf ermöglichen sowie die Ermittlung von Stammdurchmessern und -länge erlauben.

Messwertverarbeitung

Die Auswertungsalgorithmen der Rundholzvermessungsanlagen erlauben neben der beschriebenen Durchmesser- und Längenermittlung auch eine HKS-konforme Berechnung dieser Maße. Darüber hinaus können weitere äußere Merkmale des Rundholzes wie die Abholzigkeit und die Krümmung, in absehbarer Zeit wahrscheinlich auch die Ovalität (WURSTER UND WILWERDING, 1998; KAISER ET AL., 2000) erfasst werden.

Die opto-elektronische Rundholzvermessung im Werk kann also prinzipiell die von den Forstbetrieben benötigten Dimensionsmaße von Rundholz liefern. Somit wird die Ermittlung wesentlicher forstbetrieblicher Daten vom Holzkäufer vorgenommen (GRIESINGER, 1994). Um der Forstbranche die Sicherheit einer genauen und zuverlässigen Rundholzvermessung im Werk zu garantieren, werden die Vermessungsanlagen neben der Zulassung nach innerstaatlicher Eichung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt und der Eichung durch das staatliche Eichamt außerdem einer Forstlichen Sortierüberprüfung unterzogen. Ein vom Deutschen Forstwirtschaftsrat und der Vereinigung Deutscher Sägewerksverbände gemeinsam erarbeiteter Anforderungskatalog regelt dazu die automatisierte Vermessung von Rundholz auf den stationären Anlagen der Sägeindustrie (DFWR/VDS, 1994; EMHARDT, 1998). Ziel dieser Vereinbarung ist es, eine HKS-konforme Rundholzvermessung zu gewährleisten und damit eine Ermittlung der verkaufsrelevanten Daten zu ermöglichen (KAISER ET AL., 2000). Mögliche Mängel, auf die EMHARDT (1998) bei der Werkeingangsvermessung im Bereich der Messwerterhebung, -verarbeitung, der Dokumentation der Daten und der Datensicherheit hinweist, können somit reduziert werden.

Der technische Fortschritt der Hard- und Software im Bereich der opto-elektronischen Rundholzvermessung bietet den Sägewerken vielfältige Möglichkeiten für eine optimale Sortierung, macht aber zugleich Zusatzdefinitionen in den Vermessungsregelungen notwendig (HAUFFE UND MÜLLER, 2002).

2.2.4 Foto-optische Rundholzvermessung

Neben den in den Kapiteln 2.2.1 – 2.2.3 beschriebenen Rundholzvermessungsverfahren, die in der forst- und holzwirtschaftlichen Praxis auf breiter Basis eingesetzt werden, finden sich in der Literatur einige Untersuchungen über foto-optische Verfahren zur Rundholzvermessung. Im Bereich der Holzforschung (ANDERSON UND WALTER, 1995; TIAN UND MURPHY, 1997; MOËLL UND DONALDSON 2001; MOËLL UND BORGEFORS 2001) und auch schon seit zwei Jahrzehnten in der Holzwerkstoffindustrie (MELHORN UND PLINKE, 1985; ARNOLD, 1986) und Holzindustrie (ROTH, 1983) werden Einsatzmöglichkeiten von foto-optischen Verfahren zur Vermessung oder Qualitätsansprache von Holzkörpern oder Holzbestandteilen diskutiert. Bisher kommen kombinierte Verfahren aus Bildnahme und Bildverarbeitung nur vereinzelt in der Holzwirtschaft in industriellen Anwendungen zum Einsatz, obwohl diese Vermessungstechnologie eine Vielzahl von Vorteilen bietet (DEMAERSCHALK ET AL. 1980; HARTUNG UND LORENZ, 1984; GUGLHÖR, 1994).

Mit der waldseitigen foto-optischen Holzvermessung beschäftigen sich GLÄSER (1953), PRODAN (1965), GUGLHÖR (1994), MEYER (1995), ANDRADE (2001), NERUDA UND VALENTA (2002) und BERTOLA (2002).

GLÄSER (1953) stellt ein Verfahren zur foto-optischen Bestimmung von Schichtholzvolumen in Anlehnung an das Verfahren von MOUNTAIN (1949) vor. Dabei wird auf einer Polterseite eine Fläche von 1 m² markiert und fotografiert. Das Foto der Querschnittsflächen wird mit einer Nadelplatte durchlöchert und nach der Punkt-Auszählmethode werden die Einstiche gezählt, die auf dem Foto die Stammquerschnittsflächen treffen. Diese Punkte werden mit den Punkten, die den Holzkörper nicht treffen, ins Verhältnis gesetzt. Über dieses Verhältnis wird der Festgehalt des Polters hergeleitet. Bei der Festgehaltsermittlung des Holzpolters wird dabei unterstellt, dass alle Holzstücke eine Zylinderform besitzen. Mit diesem Verfahren wurde an Vorder- und Rückseite von fünf Holzpoltern eine Stammquerschnittsgesamtfläche ermittelt, die eine mittlere Abweichung von $\pm 2,46$ % gegenüber einer Fläche zeigt, die mit einem Polarplanimeter ermittelt wurde.

PRODAN (1965) beschreibt die Berechnung eines Umrechnungsfaktors anhand eines Fotos zur Bestimmung des Festgehaltes von Schichtholzpoltern. Über ein Gitternetz, das über das Foto gelegt wird, ermittelt er das Verhältnis zwischen den Punkten, die auf den Stirnflächen liegen und der Anzahl aller Punkte. Dieses Verhältnis entspricht dem Umrechnungsfaktor. Die Größe des ermittelten Umrechnungsfaktors ergibt sich aus der Form, der Stärkeklassenverteilung und der Länge der geschichteten Holzstücke. Kürzere Holzstücke lassen sich nach PRODAN (1965) besser schichten als längere Holzstücke.

GUGLHÖR (1994) beschreibt ein foto-optisches Verfahren zur Ermittlung des Holzvolumens von auf Forwardern transportierten Nadelrundholzabschnitten. Anhand eines Fotos der Rückseite der transportierten Abschnitte werden die Querschnittsflächen der Abschnitte mit Hilfe von Zirkel und Lineal ermittelt und aus den Querschnittsflächen die Rundholzvolumina hergeleitet. Er errechnet aus jeweils allen starken und allen schwachen Abschnittflächen ein Ladevolumen, das vom tatsächlichen Volumen je nach Abholzigkeit um 11 % bis 16 % abweicht. Er hält dieses Verfahren nur für umsetzbar, wenn genaue Absprachen über das dick- bzw. dünnrötige Laden der Rundholzabschnitte getroffen werden. GUGLHÖR (1994) fordert für Erdstämme mit Wurzelanlauf zusätzliche Messungen. Eine vollautomatische, computergestützte Auswertung der Fotos hält er für möglich.

Ein bildgestütztes Konzept zur summarischen Volumenerfassung wird in Ansätzen auch von MEYER (1995) vorgestellt, der gelagertes Holz mit analoger Kleinbild- und Videokamera fotografiert bzw. aufnimmt und daraus mittels Grauwertanalyse Informationen über die in den Poltern enthaltenen Holz mengen ableitet. Auf den Fotos bzw. den Videofilmsequenzen werden die Stirnflächen der Abschnitte in einem anderen Helligkeitsbereich als die Zwischenräume dargestellt. Durch diese Helligkeitsunterschiede zwischen dem Holz und den Zwischenräumen wird anhand einer Grauwertanalyse summarisch auf den „Holzanteil“ in dem Foto geschlossen. Er errechnet mittels Grauwertanalyse Holzanteile, die den wahren, auf dem Digitalisierbrett bestimmten Holzanteil um 5 % überschätzen und gibt an, dass diese Überschätzung durch die in der Grauwertanalyse mit vermessenen Rindenbestandteile verursacht werden. Mit diesem Verfahren ist es jedoch nicht möglich, die Durchmesser der einzelnen Stämme im Polter zu bestimmen. Einzelstammbasierte Aussagen lässt dieses Verfahren also nicht zu.

Auch NERUDA UND VALENTA (2002) bestimmen für Nadelrundholzabschnitte anhand von Bildern von Holzpoltern Berechnungskoeffizienten zur Ermittlung des Festmaßes der Holzpolter aus dem Raummaß.

BERTOLA (2002) ermittelt anhand von digitalen Aufnahmen von manuell geschichtetem Eukalyptusholz computergestützt den Festgehalt von Holzpoltern. Dabei leitet er Schichtungsfaktoren aus den Bildern zur Umrechnung des Festgehaltes aus dem Raummaß der Polter her.

ANDRADE (2001) bestimmt anhand von stereo-photogrammetrischen Aufnahmen, die mit einer kalibrierten digitalen Kamera aufgenommen werden, Durchmesser stehender Bäumen in verschiedenen Höhen. Mit den gemessenen Durchmessern werden die Volumina der Bäume bestimmt.

Mit der werkseitigen foto-optischen Rundholzvermessung befassen sich DEMEAERSCHALK ET AL. (1980), SILVA ET AL. (1989), CARVALHO ET AL. (1993), CORREIA ET AL. (1993), MARJOMAA UND SAIRANEN (1996).

DEMEAERSCHALK ET AL. (1980) untersuchen ein Verfahren, bei dem die Gewichtsvermessung von Stammabschnitten auf Lkws zur Volumenschätzung der transportierten Ladung mit Hilfe von zwei Fotos, die von der Rückseite und von einer Seite der Holzladung auf dem Lkw angefertigt werden, optimiert bzw. ersetzt werden soll.

Mit Hilfe eines Punktenetzes werden unter anderem die sichtbaren Stirnflächen und die seitlichen Flächen der Abschnitte abgeschätzt. Zusätzlich werden die sichtbaren Abschnitte gezählt. Mit Hilfe der erhobenen Fotovariablen ist es möglich, das Volumen der transportierten Holzladung mit geringeren Stichprobengrößen herzuleiten, als dies mit der Gewichtsvermessung der Fall ist. DEMEAERSCHALK ET AL. (1980) schlagen zur weiteren Rationalisierung dieses Vermessungsverfahrens eine Automatisierung der Fotonahme vor. Eine einzelstammbasierte Dimensionsmaßermittlung ist nicht vorgesehen.

SILVA ET AL. (1989) testen ein computergestütztes, foto-optisches System, mit dem seitliche und rückwärtige Bilder von zwei Lkw-Holzladungen angefertigt werden. Eine Ladung wurde dabei gezielt aus Abschnitten starker Dimension, eine weitere aus Abschnitten schwacher Dimension zusammengestellt. Anhand der beiden Bilder wird über die ermittelten Querschnittsflächen der Abschnitte und die fixe Abschnittslänge ein Festmaß errechnet. Dabei wird unter anderem vorausgesetzt, dass die geladenen Stammabschnitte die Form von regulären Zylindern besitzen. Sie ermitteln bei dem eingesetzten Verfahren für zwei Lkw-Ladungen, Abweichungen hinsichtlich des Ladevolumens von weniger als 5 % zum tatsächlichen Ladevolumen. Eine einzelstammbasierte Dimensionsmaßermittlung und Stückzählung ist mit dem beschriebenen Verfahren nicht durchführbar.

CORREIA ET AL. (1993) und CARVALHO ET AL. (1993) beschreiben die Volumenermittlung einer Lkw-Holzladung im Fest- und Raummaß anhand von Bildern, die von fünf monochromatischen CCD-Kameras – vier Kameras für die seitlichen Aufnahmen der Holzladung und eine Kamera für die Rückansicht der Ladung – aufgenommen werden. Nach CORREIA ET AL. (1993) ist eine Lagerung der Stammabschnitte parallel zu den Achsen des Lkws (d.h. quer auf der Ladefläche) Voraussetzung für dieses Vermessungsverfahren.

Die rückseitige Aufnahme dient der Bestimmung der fixen Länge der transportierten Abschnitte und der durchschnittlichen Ladehöhe.

Die seitlichen Aufnahmen werden genutzt, um das Raummaß über die Kontur der Holzladung zu ermitteln. Zur Ermittlung des Raummaßes werden bei der Bildverarbeitung der angefertigten Aufnahmen manuelle und automatische Verfahren genutzt.

Zusätzlich zum Raummaß wird das Festmaß der Holzladung ermittelt, indem der Anteil der Stammquerschnittsflächen an der von der Kontur der Holzladung eingeschlossenen Fläche berechnet wird.

Zur Bestimmung des Festmaßes werden neben Maskenfiltern und Segmentierungsverfahren Algorithmen zur automatischen Erkennung der Fläche, die der sichtbare Holzkörper am Lkw-Lademaß ausmacht, eingesetzt. Der entwickelte Algorithmus erlaubt eine Unterscheidung der Querschnittsflächen von ihren benachbarten Flächen und den vorhandenen Zwischenräumen.

Das Raummaß, das aus dem foto-optischen Messverfahren ermittelt wurde, zeigt im Vergleich zur traditionellen Aufnahme durchschnittliche Volumendifferenzen (Raummaß) von weniger als 5 % in 90 % der Fälle.

Da CARVALHO ET AL. (1993) als Referenz für das über das Bild ermittelte Festmaß keine einzelstammbezogenen Daten der Lkw-Holzladung zur Verfügung stehen, vergleichen sie den Quotienten zwischen dem ermittelten Raum- und Festmaß mit dem in der Papierindustrie akzeptierten Quotienten von durchschnittlich 0,67. Dieser Quotient variiert in Abhängigkeit von der Schichtung und der Dimension der Abschnitte. Der von ihnen berechnete Quotient liegt zwischen 0,55 und 0,8.

MARJOMAA UND SAIRANEN (1996) beschreiben ein foto-optisches Meßsystem zur Vermessung von auf Lkws transportiertem Rundholz. Zur Datenerfassung werden sechs Laser und zwölf Videokameras eingesetzt, die stationär in einer Halle angebracht sind. Die erfassten Daten werden computergestützt ausgewertet. Es ergab sich bei der Vermessung des Raummaßes ein durchschnittlicher Fehler von 1,35 % und bei der des Festmaßes eine Fehler von -0,06 % bei Abweichungen von -6,8 % bis + 6,3 %. Die Investitionskosten für die Vermessungsanlage betragen 1996 1 Mio. US\$.

2.2.5 Vergleichende Untersuchungen der Rundholzmaße

Eine vergleichende Untersuchung der Rundholzmaße und der Stückzahlen, die sich bei einer Harvestervermessung während der Aufarbeitung im Bestand gegenüber der elektronischen Werkeingangsvermessung im Werk ergeben, führen BUSCH ET AL. (1996), BERGMANN (1997), GRUßDORF (1997a) und MÖLLER UND SONDELL (1998) durch.

Die Volumina von Nadelrundholzabschnitten, die bei einer manuellen Rundholzvermessung im Wald und einer Harvestervermessung bei der Aufarbeitung ermittelt wurden, stellen GRUßDORF (1997a), ZIMMERMANN (1997) und BECKER ET AL. (1999) gegenüber.

BECKER UND RAUPACH (1990), BECKER UND WOBST (1990), FISCHER UND HAPPERSBERGER (1990), KLEBES UND MAHLER (1990), GUGLHÖR (1994), HASSENSTEIN UND HEIL (1996) und

BECKER (1999) vergleichen die Ergebnisse von manuellen Rundholzvermessungsverfahren mit den Ergebnissen der elektronischen Werkeingangsvermessung.

2.2.6 Kontrollmaß

Aufgrund der hohen Kosten der manuellen Rundholzvermessung besonders im Schwachholzbereich (BML, 1982; GUGLHÖR, 1994; GUGLHÖR ET AL., 1996; WAGELAAR, 1997), die vor allem beim Übergang zur hochmechanisierten Holzernte einen Schwachpunkt im Verfahrensablauf der Holzbereitstellung darstellen (MAHLER, 1998), zeigt sich ein Rückgang der klassischen Vermessungsverfahren zu Gunsten von kostengünstigeren Vermessungstechniken (SCHÖPFER, 1990). Dies hat vor allem im schwachem bis mittelstarkem Nadelstammholzsoriment zur Folge, dass der Waldbesitz die Ergebnisse der Rundholzvermessung als Serviceleistung vom Forstunternehmer oder der Holzverarbeitenden Industrie einholen muss, da er erstens die Rundholzmaße für die Geschäftsabwicklung und die innerbetriebliche Steuerung benötigt (MAHLER UND KLEBES, 1990) und zweitens eine Doppelerhebung der Maße aus Kostengründen nicht durchgeführt werden sollte (KRAFT UND VENUS, 1998). Der Waldbesitz ist bei Verlagerung der Dimensionsermittlung ins Werk auf eine möglichst rasche Abfuhr und Vermessung des Holzes angewiesen und fordert den „Einbau von Sicherheiten bzw. Kontrollmechanismen für die Durchführung der Vermessung im Werk, [...]“ (MAHLER UND KLEBES, 1990). Diese Forderungen nach Kontrollmechanismen von Seiten des Waldbesitzes werden aufgrund folgender Vorbehalte gestellt (KRAFT UND VENUS, 1998):

- Es beständen Differenzen zwischen geliefertem und im Werk vermessenem Holz aufgrund von Fehlern in der Logistik und bei der Datenübertragung.
- Es wird von Seiten des Waldbesitzes gefürchtet, dass die Rundholzvermessungsanlagen manipulierbar seien.
- Es wird eine Verzögerung der Prozesskette von der Holzbereitstellung bis zur Abrechnung des Holzes befürchtet.
- Vor allem eine unvollständige Abfuhr des Holzes und die Führenvermischung werden als weitere Vorbehalte genannt (FISCHER UND HAPPERSBERGER, 1990; EMHARDT, 1998).

Aus diesen Gründen werden Forderungen nach einem walddahen, ausreichend genauem, kostengünstigen und transparenten Kontrollmaß gestellt, das neben einer Plausibilitätsprüfung des Werkeingangsmaßes auch zur Produktionssteuerung eingesetzt werden kann (WAGELAAR, 1997).

In den Forstbetrieben wird als Kontrollmaß oftmals die Stückzahl der ins Werk gelieferten Kurzholzabschnitte genutzt. Die Stückzahlen der Kurzholzabschnitte werden am Polter aufgenommen, und mit der Polteranzahl ergibt sich die auf dem Lieferschein berechnete

Gesamtstückzahl (MAHLER UND KLEBES, 1990). Nach GUGLHÖR (1994) reicht die Stückzahl bei größerer Variabilität der Durchmesserklassen als Kontrollmaß nicht aus. Da das Kontrollmaß hohen Ansprüchen (d.h. ersatzweise Einsatz als Verkaufsmaß) genügen muss, fordert er, zu Kontrollzwecken, ein Stichprobenverfahren einzusetzen (GUGLHÖR, 1996).

FISCHER UND HAPPERSBERGER (1990) schlagen vor, als Kontrollmaß neben der Stückzahl auch eine d_1 -Summenkurve (d_1 = Durchmesser 1 Meter über Abhieb des Stammes) zur Identifizierung des Hiebes zu ermitteln.

WILWERDING UND GROß (1996) schlagen als Kontrollmaß für die Werkeingangsvermessung ein Raummaßverfahren für Standardlängen und Industrieholz vor, bei dem zusätzlich die Gesamtstückzahl als Kontrollmaß erhoben werden kann.

Die Möglichkeiten des Einsatzes des Harvestermaßes als walddnahe Kontrollmaß beschreiben DREEKE (1994), WAGELAAR (1997), WÖTZEL (1997).

Abschließend kann festgehalten werden, dass die traditionelle Waldvermessung in der hochmechanisierten Holzernte einen Schwachpunkt im Verfahrensablauf der Holzbereitstellung darstellt (MAHLER, 1998), und dass noch erhebliche Rationalisierungsmöglichkeiten der konventionellen waldseitigen Vermessung und Sortierung bei schwachem Nadelstammholz mit Hilfe EDV-gestützter Verfahren bestehen (SCHÖPFER, 1990). „Waldseitig fehlen bisher automatisierte Vermessungstechnologien, die von allen Betroffenen akzeptiert werden.“ (WURSTER UND WILWERDING, 1998).

3 Material, Methoden und Versuche

3.1 Konzept der Untersuchung

Die Arbeit zielt auf die Entwicklung eines foto-optischen, computergestützten Verfahrens zur Ermittlung der Stückzahl, der Durchmesser- und der Volumina von Fichten-Rundholzabschnitten in Standardlängen.

Zur schnellen und einfachen Abwicklung sollen die Dimensionsmaße für den einzelnen Abschnitt dabei aus Bildern von größeren, praxisüblichen Abschnittskollektiven (Lkw-Ladung oder als Lagereinheit (Polter) an der Waldstraße) abgeleitet werden.

Die Stirnfläche wird dazu foto-optisch mit einer Digitalkamera erfasst. Die Durchmesser der einzelnen Abschnitte werden anhand ihrer sichtbaren Abschnittsstirnflächen errechnet. Zusammen mit der (bekannten) Standardlänge kann daraus das Abschnittsvolumen und durch Addition das Polter- bzw. Ladungsvolumen ermittelt werden.

Zu Beginn der Untersuchung werden die Digitalkamera und die damit erreichbare Bildqualität unter Laborbedingungen getestet. Dabei werden die Rahmenbedingungen für die Aufnahmeentfernung und die Kameraeinstellungen für die Feldaufnahmen festgesetzt.

Unter realen Bedingungen erfolgt die foto-optische Messwerterhebung mit der Digitalkamera als zweidimensionale Bilderfassung der Abschnittsstirnflächen an den Nadelrundholzpoltern bzw. Lkw-Ladungen.

Beim foto-optischen Verfahren wird ein Kollektiv von Abschnitten als Transport- oder Lagerungseinheit (Polter) mit einem Bild aufgenommen. Ihre Dimensionsmaße sollen einzelnstammweise ermittelt werden. Dabei ist die räumliche Position der Abschnitte in der Lagerungseinheit für die Vermessung der Abschnittsstirnfläche im Bild von Bedeutung, da bei der Bildauswertung für alle Abschnitte in einem Bild derselbe Bildmaßstab verwendet wird, d.h. dieselbe Distanz unterstellt wird.

Einzelne Abschnitte werden bei der Lagerung an der Waldstraße oder beim Transport auf dem Lkw jedoch nicht bündig gelagert. Sie nehmen deshalb eine vor- oder zurückversetzte Position – bezogen auf die Bildebene der Transport- und Lagereinheit – ein und unterscheiden sich so von anderen Abschnitten im Polter in ihrer Aufnahmeentfernung. Der daraus resultierende Flächenfehler bei der zweidimensionalen Aufnahme soll abgeschätzt werden. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine dreidimensionale (stereo-photogrammetrische) foto-optische Erfassung der Abschnitte durchgeführt, die eine entfernungsunabhängige Vermessung der Abschnittsstirnflächen im Bild ermöglicht.

Aus den zweidimensional aufgenommenen Fotos werden die Abschnittsstirflächen mit Bildverarbeitungsverfahren und -routinen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden, hergeleitet.

Die Abschnitte unterscheiden sich jedoch nicht nur in ihrer Stirnflächengröße, sondern auch in ihrer Stirnflächenform.

Da anhand der Stirnflächen auch die Volumina der Abschnitte möglichst genau ermittelt werden sollen, muss auch die Stirnflächenform berücksichtigt werden. Dazu müssen die Formen der Abschnittsstirflächen erfasst und beschrieben werden. Das ist einerseits möglich, indem die Formen der Abschnittsstirflächen visuell beschrieben und anhand gleicher Merkmale einer gemeinsamen „Formklasse“ zugeordnet werden.

Andererseits soll untersucht werden, ob eine Zuordnung der Stirnfläche zu einer „Formklasse“ anhand von Merkmalen, die mathematisch aus Stirnflächenvariablen hergeleitet werden, möglich ist. Zu diesen Stirnflächenvariablen zählen z.B. der Schwerpunkt sowie verschiedene Radien der Stirnflächen. Für die Ermittlung dieser Variablen werden entsprechende Auswertungsroutinen entwickelt.

Neben unterschiedlichen Stirnflächenformen weisen Abschnitte mit unrunder sichtbaren Stirnflächen oftmals auch unregelmäßige Formveränderungen entlang der Abschnittslängsachse auf. So zeigen Stirnflächen am Stammfuß aufgrund eines Wurzelanlaufs oftmals eine wellige Stirnflächenform, die entlang der weiteren Abschnittslängsachse nicht mehr zu beobachten ist. Die sichtbare Stirnfläche ist somit nicht repräsentativ für die weitere Form des Abschnitts entlang seiner Stammachse und würde gegebenenfalls zu Volumenfehlern führen.

Es wird deshalb auf Basis der sichtbaren Stirnfläche – getrennt nach den „Formklassen“ – nach einer geometrisch konstruierten Stirnfläche gesucht, die das Abschnittsvolumen genauer schätzt. Diese geometrisch konstruierte Stirnfläche wird mit den genannten Stirnflächenvariablen errechnet. Dabei werden Abschnittsvolumina getrennt für die Fuß- und Zopfenden der Abschnitte modelliert.

Die fotografierten Abschnitte werden zudem

- manuell (Kluppe)
- mechanisch-hydraulisch (Harvester)
- opto-elektronisch (Werkeingangsvermessung)

vermessen, um Vergleichsmaße für die foto-optisch ermittelten Dimensionsmaße mittels Vermessungsverfahren der forstlichen und holzindustriellen Praxis bereitzustellen.

Beim Vergleich der ermittelten Stirnflächen muss berücksichtigt werden, dass beim foto-optischen Verfahren die Stirnfläche in ihrer Form vollständig durch ein Einkreisen (Delinieren) der Stirnflächen aufgenommen wird. Bei den genannten praxisüblichen Vermessungsverfahren werden die Stirnflächen jedoch aus höchstens zwei Durchmessermaßen errechnet. In diesen Vermessungsverfahren werden möglicherweise Formunterschiede der Stirnflächen nicht erfasst. Deshalb soll untersucht werden, ob auftretende Flächenunterschiede, die sich zwischen foto-optischen und praxisüblichen Vermessungsverfahren ergeben, mit Hilfe der gebildeten „Formklassen“ erklären lassen.

3.2 Foto-optische Vermessungsverfahren

Die foto-optische Messwerterhebung der Abschnittsstirnflächen wurde in dieser Arbeit mit Hilfe einer handelsüblichen Digitalkamera durchgeführt. Erste Bildnahmen erfolgten zunächst unter Laborbedingungen in einer Halle. Die praxisnahen Versuchsfotos wurden auf einem Rundholzzwischenlagerplatz im „Rheinhafen“, im Bestand an der Waldstraße und am Werkseingang eines Sägewerks aufgenommen. Mit Ausnahme der Hallenaufnahmen wurden also solche Orte der Bildnahme gewählt, die Schnittstellen im Informations- und Warenfluss des Rundholzes innerhalb der Logistikkette „Wald-Werk“ darstellen. Auf diese Weise können auch die Umgebungsbedingungen vor Ort, wie sie für eine Bildnahme an späteren Einsatzorten zu erwarten sind, abgebildet werden.

In den foto-optischen Verfahren sind unterschiedliche Bildaufnahme- und -verarbeitungssysteme integriert, die in der Regel aus folgenden Hard- und Softwarekomponenten bestehen JÄHNE (2002):

- einem Bildaufnahmesystem
- einem Bildspeicher
- einem Bildverarbeitungssystem

Im Folgenden werden diese Komponenten beschrieben.

3.2.1 Zweidimensionales Aufnahmeverfahren

3.2.1.1 Bildaufnahme

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Digitalkameras, die Beleuchtung, der Maßstab und das Aufnahmeverfahren beschrieben und Überlegungen zur Kameraoptik und Bildvorverarbeitung zusammengefasst.

Kamera

Digitalkameras erlauben qualitativ hochauflösende Aufnahmen und ermöglichen mittels eingebauten, qualitativ hochwertigen und großformatigen TFT-Displays eine direkte Qualitätsüberprüfung der angefertigten Aufnahmen und eine zeitnahe Datenübertragung auf ein Rechnersystem zur Weiterverarbeitung der Bilder. Für die Auswahl der in dieser Untersuchung eingesetzten Digitalkamera ist neben einem hochauflösenden Sensor und Monitor eine Vielzahl an technischen Anforderungen zu berücksichtigen. In dieser Untersuchung wurde eine *Nikon Coolpix 990* (Fertigungsjahr 2000) eingesetzt, die über einen 3,34-Megapixel Sensor verfügt, um qualitativ hochwertige Bilder mit einer Größe von 2048 x 1536 Pixel anzufertigen.

Um die Bildqualität höher auflösender Kameras im foto-optischen Verfahren zu testen, wurde in einer Laboruntersuchung zusätzlich eine *Nikon Coolpix 5700* eingesetzt, die über eine Auflösung von 5-Megapixel verfügt.

Kameraoptik und Bildvorverarbeitung

Bei der Bildaufnahme, der Bildvorverarbeitung und der anschließenden Bildverarbeitung sind folgende Überlegungen zu der Kameraoptik zu beachten.

Die Abbildung eines Objektes und somit auch die Messergebnisse, die sich bei der Weiterverarbeitung dieser Abbildung ergeben, werden von allen Komponenten eines digitalen Aufnahmesystems beeinflusst (GODDING, 2003).

Die Kamera wird als räumliches System betrachtet, dessen Bestandteile die Bildfläche (Film, Bildsensor) und das davor gelegene Projektionszentrum O' bilden (Abbildung 1) (LUHMANN, 2000). Bei der Bildnahme entspricht die Abbildung eines Objektes P im Idealfall dem mathematischen Modell der Zentralperspektive (Abbildung 1).

Die Parameter der inneren Orientierung einer Kamera beschreiben das geometrische Kameramodell (LUHMANN, 2000). Dazu gehören die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem und die Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung. Zu den Parametern der inneren Orientierung zählen der Bildhauptpunkt H' und die Kammerkonstante c , die den Abstand zwischen der Bildebene und dem Projektionszentrum definiert (LUHMANN, 2000).

Der Bildhauptpunkt H' entspricht dem Lotfußpunkt des Projektionszentrums zur Bildebene (Abbildung 1).

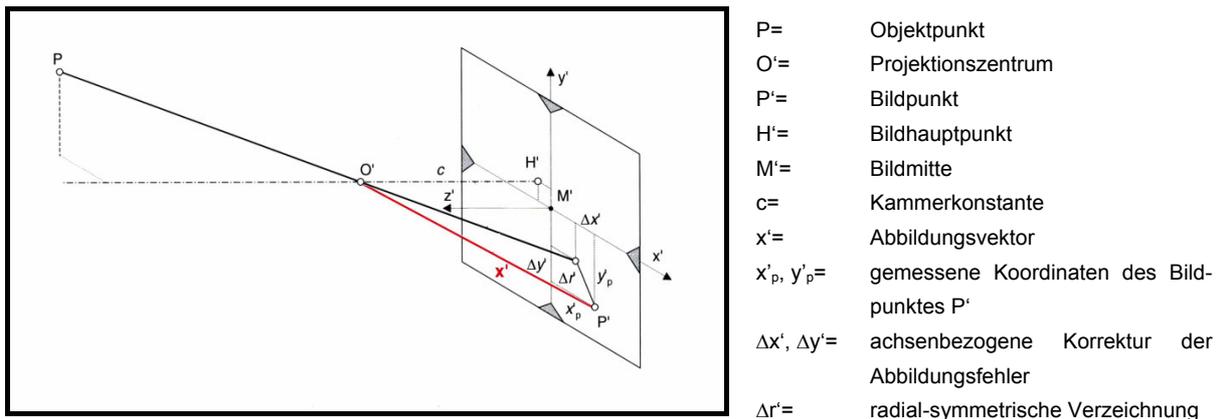


Abbildung 1: Zentralperspektive/ Abweichungen von der Zentralperspektive / Innere Orientierung (aus LUHMANN, 2000)

Reale Linsensysteme weichen von der perfekten Zentralprojektion ab (JÄHNE, 2002). Diese Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung aufgrund physikalischer Effekte werden Verzeichnung genannt.

Es werden die radial-symmetrische, die radial-asymmetrische und die tangentielle Verzeichnung unterschieden (vgl. Anhang Kapitel 12.1).

Für eine Korrektur der Verzeichnung ist die Bestimmung der Verzeichnungsparameter notwendig. Dazu wird eine Kalibrierung der Kamera durchgeführt (vgl. Anhang Kapitel 12.3). Die Kalibrierung der Kamera wurde am Institut für Angewandte Photogrammetrie der FH Oldenburg vorgenommen. Dort wurden auch die angefertigten Aufnahmen verzeichnungsfrei gerechnet.

Beleuchtung

Bei den Laboruntersuchungen konnte aufgrund ausreichender Bildhelligkeit im Raum auf den Einsatz eines externen Blitzgerätes sowie von zusätzlichen Strahlungsquellen verzichtet werden.

Auf dem Zwischenlagerplatz im Rheinhafen wurde zur Objektbeleuchtung ein externes Blitzgerät mit einer Leitzahl von 40 eingesetzt.

Aufgrund von Lichtreflexionen an den Bildmaßstäben wurde bei den Aufnahmen an der Waldstraße und am Sägewerkseingang auf eine externe Beleuchtung verzichtet und die Bildhelligkeit über die Kameraeinstellungen Belichtungszeit und Blendenöffnung mittels Belichtungsmessers gesteuert.

Maßstab

Zur Vermessung der im Bild dargestellten Objekte unbekannter Größe ist es erforderlich, mindestens eine Objektgröße zu kennen. Dieses Objekt bekannter Größe wird im Bild als

Maßstab verwendet. Der Bildmaßstab gibt das Verhältnis einer Bildstrecke zur entsprechenden Objektstrecke an (GEOINFORMATIK-SERVICE, 2002). Bei der Aufnahme eines Objektes gibt es zwei Möglichkeiten einer Maßstabswahl. Es wird ein (Teil-) Objekt bekannter Größe an dem aufzunehmenden Objekt als Maßstab gewählt oder ein geeigneter Maßstab am Objekt positioniert.

In dieser Arbeit wurden beide Verfahren eingesetzt, um Erfahrungen für die spätere Praxisanwendung zu erlangen.

Im Rheinhafen konnte einerseits wegen der ständig wechselnden Abladeorte der holztransportierenden Lkws und andererseits wegen des zur Verfügung stehenden kleinen Zeitfensters zum Fotografieren der Lkws kein besonderer Maßstab an den Lkws angebracht bzw. neben den Lkws aufgestellt werden. Aus diesem Grund wurde das amtliche Kfz-Kennzeichen der Rundholz transportierenden Lkws als Bildmaßstab verwendet.

Bei den ersten Probeaufnahmen am Werkseingang konnte als Maßstab ein Schild, dessen Länge und Breite bekannt war, an der Holzladung des transportierenden Lkws angebracht werden.

Für die Versuche unter Laborbedingungen, an der Waldstraße und am Werkseingang wurde weiterhin ein vollelektronisch vermessenes Passpunktsystem entwickelt und dieses zusätzlich zum zuvor beschriebenen Maßstab eingesetzt. Mit diesem Passpunktsystem konnten auch die zu Versuchszwecken dreidimensionalen (stereo-photogrammetrischen) Bildaufnahmen ausgewertet werden. Das Passpunktsystem besteht aus vier Nivellierlatten, die um das Holzpolter/die Holzladung mit Hilfe von Stativen positioniert wurden (Abbildung 2).

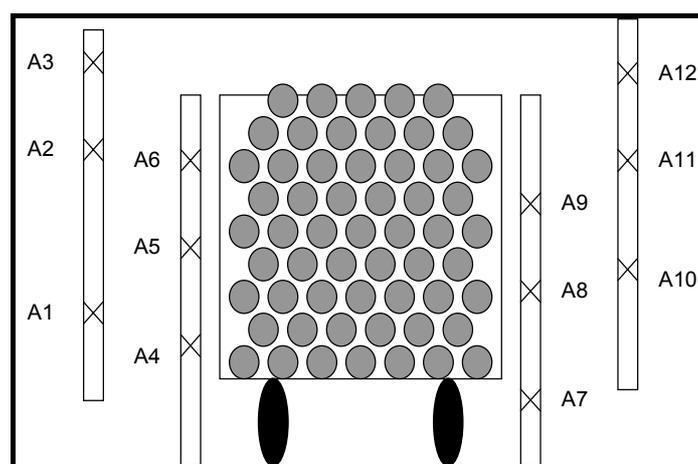


Abbildung 2: Passpunktsystem um die Lkw-Holzladungen

Zwei Nivellierlatten wurden rechts und links vom Holzpolter/von der Holzladung in einer Entfernung so aufgestellt, dass sie mit den der Kamera am nächsten liegenden Abschnitts-stirnflächen eine Ebene bildeten. Falls einzelne Abschnitte über 0,5 m aus der Ladung / dem

Polter hervorstanden, wurde deren Position beim Aufstellen der Nivellierlatten nicht berücksichtigt.

Die beiden anderen Nivellierlatten wurden ebenfalls rechts und links von der Ladung/dem Polter, aber nach hinten versetzt aufgestellt, so dass sie mit den Abschnittsstirnflächen, die am weitesten von der Kamera entfernt lagen, eine Ebene bildeten. Auch hier blieben einzelne über 0,5 m in die Ladung/dem Polter zurückgeschobene Abschnitte unberücksichtigt.

Werden jeweils zwei benachbarte Nivellierlatten mit gedachten Linien miteinander verbunden, so spannen diese einen rechteckigen Raum auf.

An den Nivellierlatten wurden jeweils 3 Reflektormarken angebracht, die in der Mitte mit einem Fadenkreuz versehen sind und Infrarotlicht reflektieren (Abbildung 3).

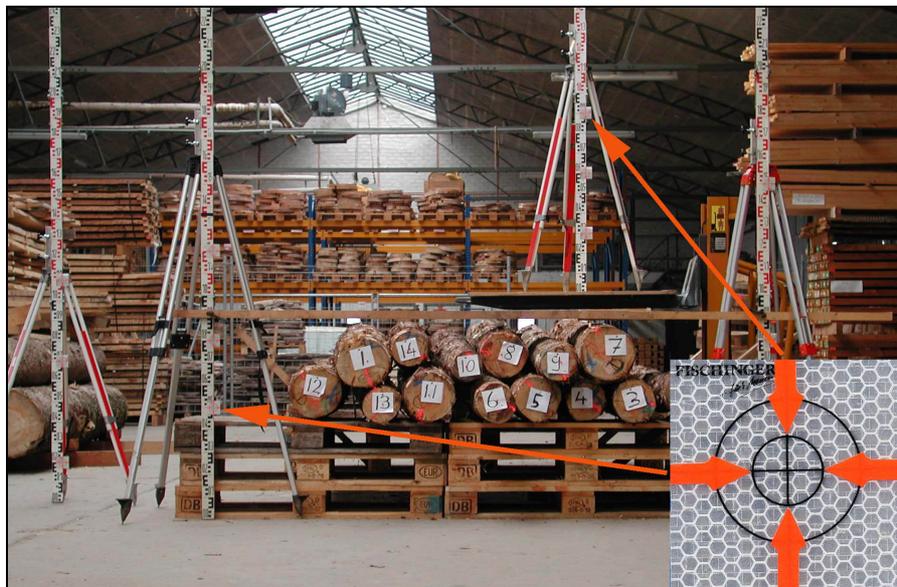


Abbildung 3: Maßstab/Passpunktsystem/Reflektormarke

Die Fadenkreuze der Reflektormarken wurden an den 10 cm-Marken der Nivellierlatten und der Außenkante der Nivellierlatte so angebracht, dass die Mittelpunkte der Fadenkreuze bei möglicher Bildunschärfe oder Reflexion bei der späteren Bildauswertung dennoch definiert werden konnten.

Die Passpunkte (Reflektormarken) wurden auf den Nivellierlatten mit einer Totalstation der Marke Topcon (GTS-703), die neben einer Koordinatenmessung auch Winkelmessungen (Horizontal- und Vertikalwinkel) und Streckenmessungen erlaubt, eingemessen.

Mit Hilfe dieses Passpunktsystems war es möglich, ein lokales Koordinatensystem für die anschließende Bildauswertung einzurichten. Das Koordinatensystem erlaubte eine Bestimmung der räumlichen Lage der einzelnen Stammabschnitte im Polter.

Die einzumessenden Passpunkte wurden ausgehend vom linken unteren Passpunkt mit den Kürzeln A1 bis A12 durchnummeriert (siehe Abbildung 2). Um das lokale Koordinatensystem einzumessen, wurde der Passpunkt A1 bezüglich des Rechtswertes, d.h. bezüglich der Abweichung in der Horizontalen, als Nullwert eingestellt, so dass die weiteren Passpunkte im Verhältnis zum Passpunkt A1 eingemessen werden konnten. Zudem wurde der Hochwert, also die Abweichung in der Vertikalen, durch die Eingabe der Instrumentenhöhe auf den Fußpunkt der Totalstation definiert.

Als Ergebnis dieser Passpunktvermessung konnten Rechts-, Hoch- und Tiefwert der Passpunkte festgelegt werden.

Neben der Koordinatenbestimmung der Passpunkte für die Auswertung der stereophotogrammetrischen Aufnahmen (Kapitel 3.2.2.2) wurden die Spannmaße zwischen den einzelnen Passpunkten für die Auswertung der digitalen Bilder aufgenommen (vgl. Kapitel 3.2.1.3.1). Als Spannmaß wird die Distanz zwischen zwei Passpunkten bezeichnet. Die Totalstation berechnet bei der Messung die Horizontal- und die Schrägdistanz sowie die Höhendifferenz zwischen den einzelnen Passpunkten.

Aufnahmeverfahren

Für die foto-optische Erfassung der Abschnittsstirnflächen mittels Digitalkamera wurde eine Aufnahmeentfernung von 10 Metern gewählt. Diese Entfernung wurde unter Laborbedingungen in Vorversuchen, bei denen die Lademaße der Lkws nachgestellt wurden, ermittelt.

Diese Aufnahmeentfernung erlaubt bei ausreichender Auflösung, das Lkw-Lademaß vollformatig zu erfassen und im Bestand mit einer Aufnahme eine ausreichend große Anzahl von Abschnittsstirnflächen eines Polters zu fotografieren.

Eine Aufnahmeentfernung größer als 10 Meter wurde aufgrund der begrenzten räumlichen Gegebenheiten bei Aufnahmen eines am Bestandesrand gelagerten Polters als nicht praktikabel verworfen.

Die Lkws transportierten unabhängig vom Wagentyp – Sattelaufleger und Kurzholzanhänger – jeweils zwei Holzstöße. Die Nadelrundholzabschnitte wurden dabei mit ihrer Längsachse in Fahrtrichtung transportiert, so dass die Stirnflächen der Abschnitte am Fahrzeugheck sichtbar waren.

Bei Lkws mit Sattelaufleger werden beide Holzstöße auf dem Aufleger transportiert, bei Lkws mit Kurzholzanhänger der vordere Stoß auf dem Kurzholzaufbau der Zugmaschine, der hintere auf dem Anhänger.

Zuerst wurde die Rückseite des hinteren Holzstoßes fotografiert. Dazu wurde die Kamera in einer Aufnahmeentfernung von 10 m hinter dem Lkw positioniert (Abbildung 4, links). Als Maßstab wurde das Passpunktsystem eingesetzt.

Nach Entladung des vorderen Holzstoßes, der weder während des Transportes noch beim Be- oder Entladevorgang eingesehen werden konnte, und deshalb auch nicht in die Versuche einbezogen wurde, wurde die Vorderseite des hinteren Holzstoßes fotografiert (Abbildung 4, rechts). Die Aufnahmeentfernung war durch die Abmessungen des Lkws auf 7,30 m (Entfernung: Holzstoß-Kranaufbau) begrenzt.



Abbildung 4: links: Fotonahme der Rückseite des hinteren Holzstoßes des Lkws; rechts: Fotonahme der Vorderseite des hinteren Holzstoßes nach Entladung des vorderen Holzstoßes

Als Maßstab wurde ein genormtes Schild, dessen Maße bekannt waren, eingesetzt. Eine Aufnahme mit dem Passpunktsystem als Maßstab war bei dieser Aufnahme wegen des zeitlichen Verzugs, den eine erneute Einmessung der Passpunkte verursacht hätte, nicht möglich.

Die Fotos wurden jeweils mit einer Kamerabrennweite von 16,2 mm angefertigt. Diese Brennweite erlaubt bei den gegebenen Aufnahmeentfernungen eine vollformatige Aufnahme der Polter an der Waldstraße bzw. der Holzladungen auf dem Lkw.

Die Kamera wurde mittels Stativ in eine Aufnahmeposition gebracht, die eine möglichst unverschwenkte Senkrechtaufnahme des Objektes erlaubte. Unverschwenkt bedeutet, dass die gedachte Bildebene sowohl vertikal als auch horizontal senkrecht fotografiert wird.

Dazu wurde zur Fotonahme bei den Poltern an der Waldstraße und den Holzladungen auf dem Lkw der Mittelpunkt des aufzunehmenden Polters bzw. der Lkw-Holzladung markiert und die Aufnahmeposition der Kamera mit einem Maßband in einem Abstand von 10 Metern eingemessen. Von dieser Aufnahmeposition aus wurde fotografiert.

Mit einer solchen Bildaufnahmesituation sollen perspektivische Verzerrungen, wie sie DEHN ET AL. (1985) beschreiben, vermieden werden, bei denen Objekt- und Bildstrecke nicht mehr

über einen einheitlichen Maßstab ins Verhältnis gesetzt werden können. Nach DEHN ET AL. (1985) erscheinen gleiche Abstände des Objektraumes gegeneinander verkürzt auf dem Bild.

Nach MEYER (1995) hängt der Messfehler bei Längenbestimmungen (z.B. von Stirnflächendurchmessern) auf dem Bild, der sich bei der Abweichung von der lotrechten Aufnahme ergibt, direkt vom Abweichungswinkel zwischen der Betrachtungsrichtung und der Senkrechten zum Holzpolter ab. Bei der Vorgabe eines maximal zulässigen Fehlers von $\leq 5\%$ errechnet er einen Abweichungswinkel α zur Senkrechten von $-12,6^\circ \leq \alpha \leq 12,6^\circ$ (Abbildung 5).

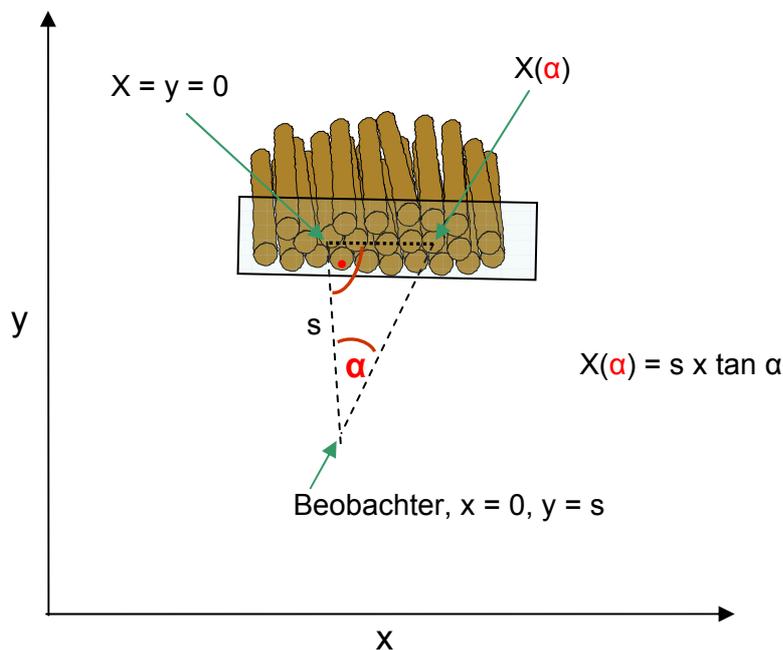


Abbildung 5: Betrachtung eines Holzpolters unter dem Winkel α (verändert nach MEYER, 1995)

Er schlägt im praktischen Einsatz vor, möglichst lotrecht zu fotografieren, da auch bei bekanntem Aufnahmewinkel eine Korrektur der Bildkoordinaten sehr rechenintensiv ist. Die Rechenintensität ergibt sich aufgrund der Maßstabsfaktoren, die für jeden Punkt des Bildes getrennt errechnet werden müssten. Denn nur bei strengen Senkrechtaufnahmen kann für das Bild ein einheitlicher Bildmaßstab verwendet werden (LUHMANN, 2000). „Liegen die Abweichungen von einer Senkrechtaufnahme innerhalb gewisser Grenzen, kann für die weiteren Abschätzungen eine mittlere Bildmaßstabszahl für einen mittleren Aufnahmeabstand verwendet werden.“ (LUHMANN, 2000).

Um diese perspektivischen Verzerrungen zu minimieren, wurde bei der Fotonahme mit der Kamera der Ladungs- bzw. Polterungsmittelpunkt lotrecht anvisiert.

3.2.1.2 Bildspeicherung und Bildübertragung

Die Bilder wurden auf einer *CompactFlash*® Card, die häufig als Speichermedium für Digitalkameras eingesetzt werden, im „.tif“- oder „.jpg“-Format gespeichert und über ein USB - Kabel von der Digitalkamera auf ein Notebook übertragen.

3.2.1.3 Bildverarbeitung

Anhand der von den Holzpoltern/Holzladungen angefertigten Fotos sollen zum einen die Stückzahl der abgebildeten Abschnitte und zum anderen deren Stirnflächen ermittelt werden. Da das Zählen von Partikeln und die Bestimmung ihrer Größenverteilung als eine klassische Aufgabe der digitalen Bildverarbeitung angesehen wird, soll hier kurz auf die Hierarchie von Bildverarbeitungsschritten von der Bildaufnahme bis zum Bildverstehen eingegangen werden. Eine eingehendere Darstellung findet sich z.B. bei JÄHNE (2002).

Nach JÄHNE (2002) ist die Bildverarbeitung ein mehrstufiger Prozess. Zu Beginn dieses mehrstufigen Prozesses steht die Bildaufnahme. Anschließend wird das Bild in eine Form gebracht, die eine Weiterverarbeitung mit einem Digitalrechner erlaubt (Digitalisierung). Die bei der Bildaufnahme durch das Aufnahmesystem entstandenen geometrischen Störungen werden in der ersten Verarbeitungsstufe, der Bildvorverarbeitung (Kapitel 3.2.1.1) behoben. An die Bildvorverarbeitung knüpft die eigentliche Bildverarbeitung an. Sie umfasst unter anderem folgende Operationen (JÄHNE, 2002):

- Bildfilterungen (zum Beispiel Mittelung und Kantendetektion) zur Unterscheidung der interessierenden Objekte von anderen Objekten und vom Hintergrund.
- Segmentierungsverfahren zur Separation der Objekte vom Hintergrund.
- Klassifizierung der Objekte bei Kenntnis von Formparametern der interessierenden Objekte wie der Fläche, dem Umfang oder dem mittleren Grauwert der Objekte.

Nach den im Kapitel 3.2.1.1 dargestellten Arbeitsschritten der Bildaufnahme werden die Verfahren beschrieben, mit denen die Versuchsfotos be- und verarbeitet wurden. Bei diesen bildbe- und -verarbeitenden Verfahren kann nach dem Automatisierungsgrad zwischen manuellen und halb- bzw. vollautomatisierten Verfahren unterschieden werden.

Die Auswertung der Fotos wurde in dieser Arbeit ausschließlich mit den dazu entwickelten manuellen Routinen durchgeführt, da eine Programmierung einer vollfunktionsfähigen, automatisierten Auswertungsroutine innerhalb dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen nicht geleistet werden konnte. Es werden jedoch zu den entsprechenden Bildverarbeitungsschrit-

ten Verfahrensbausteine konzipiert und vorgestellt, die als Elemente bei der Weiterentwicklung hin zu einer automatisierten Bildverarbeitungsroutine dienen können.

3.2.1.3.1 Manuelle Bildauswertung

Für die Bildauswertung der angefertigten Fotos wurden zwei manuelle Verfahren eingesetzt. Mit dem ersten Verfahren – einer am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg entwickelten Bildauswertungsroutine – wurde dann gearbeitet, wenn als Maßstab bei der Bildnahme Objekte eingesetzt wurden, deren Größen vorab bekannt waren.

Diese Routine arbeitet auf Basis der Software *Adobe Photoshop® D1-4.0.1* und *Scion Image for Windows Release Beta 4.0.2* von *Scion Corporation©*.

In *Photoshop D1-4.0.1* wurden die Konturen der Abschnittsstirnflächen markiert und die eingeschlossenen Stirnflächen mit einer einheitlichen Farbe versehen. Eine Markierung der Rinde unterblieb, da diese insbesondere im Bereich der Stirnflächen häufig abgeplatzt oder nicht mehr fest mit dem Holzkörper verbunden war.

Ebenso wurden die Umrisse der Maßstäbe in *Photoshop D1-4.0.1* umfahren und die umschlossenen Flächen mit einer einheitlichen Farbe versehen. Als problematisch beim Umfahren der Maßstäbe erschien die Blitzlichtreflexion bei nachlassendem Tageslicht. Vor allem bei den in der Dunkelheit angefertigten Fotos, die zum Teil Unschärfen aufwiesen, war ein präzises Abgreifen der Maßstäbe schwierig. Das Umfahren der amtl. Kfz-Kennzeichen (Maßstäbe) war jedoch aufgrund der Kenntnis der Kennzeichenmaße möglich.

Die farblich markierten Abschnittsstirnflächen und Maßstäbe wurden in einer neuen Bilddatei mit reduzierter Bildgröße zur Berechnung der Flächengrößen abgelegt und mit der *Software Scion Image for Windows Release Beta 4.0.2* ausgewertet.

Scion Image for Windows Release Beta 4.0.2 ermöglicht nach der Festlegung des Bildmaßstabes eine Berechnung der Flächengröße verschiedener Objekte durch Zählung der Pixel des Objektes. Die Pixel eines Objektes werden dann für objektzugehörig befunden, wenn sie über den gleichen Pixelgrauwert verfügen. Da den Objekten zuvor in *Photoshop D1-4.0.1* eine einheitliche Farbe zugewiesen wurde, verfügten die Pixel der Abschnittsstirnflächen über den gleichen Pixelgrauwert.

Die Abschnittsstirnflächen wurden nach der Pixelzählung automatisch nummeriert und zu jeder Abschnittsstirnfläche die entsprechende Flächengröße (in cm^2) berechnet (Abbildung 6).

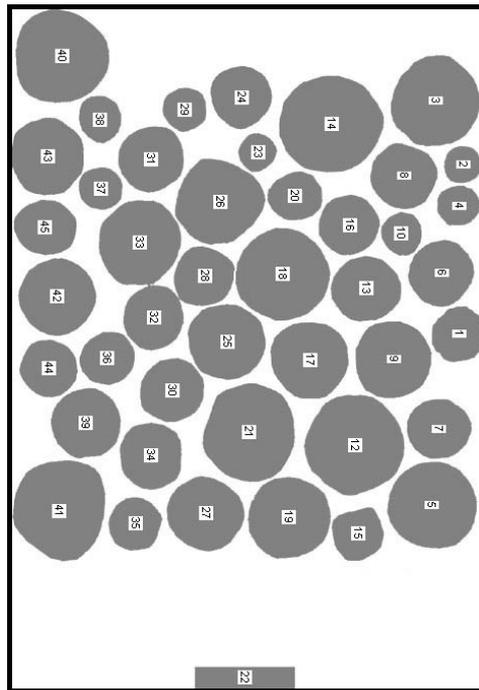


Abbildung 6: Nummerierte und markierte Abschnittsstirnflächen mit Maßstab

Die errechneten Daten der Abschnittsstirnflächen werden nach *Microsoft® Excel* zur weiteren Datenbearbeitung exportiert.

Ein zweites manuelles Bildauswertungsverfahren wurde für die Fälle entwickelt, bei denen der Passpunktmaßstab, der für die Aufnahmen an der Waldstraße und am Werkseingang eingesetzt wurde, neben der Berechnung der Abschnittsstirnflächen weitere Auswertungen zuließ.

Mit Hilfe der Passpunkte, die im Bild angefahren wurden und deren Distanz zueinander durch die Koordinatenmessung mit der Totalstation bekannt war, konnte die räumliche Lage der Abschnitte zu den Passpunkten in zweidimensionaler Richtung (Bildhöhe und Bildbreite) und die Lage der Abschnitte zueinander ermittelt werden. Das Bild wird somit in ein Koordinatensystem eingepasst.

Dadurch wird auch ein direkter Ergebnisvergleich des zweidimensionalen Verfahrens mit den versuchsweise durchgeführten dreidimensionalen (stereo-photogrammetrischen) Aufnahmen möglich. Nicht nur die ermittelten Abschnittsstirnflächen der beiden Verfahren, sondern auch deren Lage kann direkt visuell in einem Bild miteinander verglichen werden.

Die Bildverarbeitungs- und Auswertungsroutine erfolgte mittels der Software *Esri ArcView Gis 3.2®*. Nach Import des Bildes wird das Bild in ein Raster-Geosystem (Grid) transformiert. Dabei werden die Bilder in Raster umgewandelt. Durch diese Umwandlung in ein

Raster werden raumbezogene Informationen in ein reguläres Gitter oder in eine Matrix zur Auswertung freigegeben (DIREKTHILFE *ARCVIEW 3.2. GIS*).

Innerhalb des Grids werden vier vermessene Passpunkte des Maßstabs markiert und zu einem Polygonzug verbunden. Der Umfang des Polygonzugs wird mittels der mit der Totalstation eingemessenen Passpunktkoordinaten bzw. deren Spannmaße errechnet. Mit einem in der *ArcView GIS 3.2* internen Programmiersprache *Avenue* geschriebenen Skript wird aus dem Umfang des Polygonzugs die Pixelgröße errechnet. Mit der Pixelgröße und der Pixelanzahl wird die Polygonfläche, die der markierte Polygonzug einschließt, berechnet (Abbildung 7).

Die aus dem Bild errechnete Polygonfläche wird mit der realen Polygonfläche verglichen. Die reale Polygonfläche wird aus den Passpunktkoordinaten über die Formel nach HERON hergeleitet. Dazu wurde das Polygon in zwei Dreiecke aufgeteilt. Über die Formel

$$A_{abc} = \sqrt{k * (k - a) * (k - b) * (k - c)} \quad (6),$$

mit $a, b, c =$ drei Seiten des Dreiecks

$k =$ halber Umfang des Dreiecks a, b, c

lässt sich die Fläche der beiden Dreiecke berechnen. Die Ergebnisse der Dreiecksberechnung wurden addiert.

Der Vergleich der realen Polygonfläche mit der aus dem Bild ermittelten Polygonfläche erlaubt eine prozentuale Fehlerabschätzung pro Bild, die in den weiteren Auswertungsschritten berücksichtigt wird.

Die Abschnittsstirflächen werden mit einem geschlossenen Polygonzug manuell markiert. Die Rinde der Abschnittsstirflächen wird in die Markierung nicht einbezogen. Bei der Markierung der Abschnittsstirflächen erzeugt jeder Mausklick am Stirflächenrand eine Koordinate des einkreisenden Polygonzugs.

Über die errechnete Pixelgröße und die Anzahl der Pixel, die der Stirflächenpolygonzug einschließt, werden die Abschnittsstirflächen berechnet.

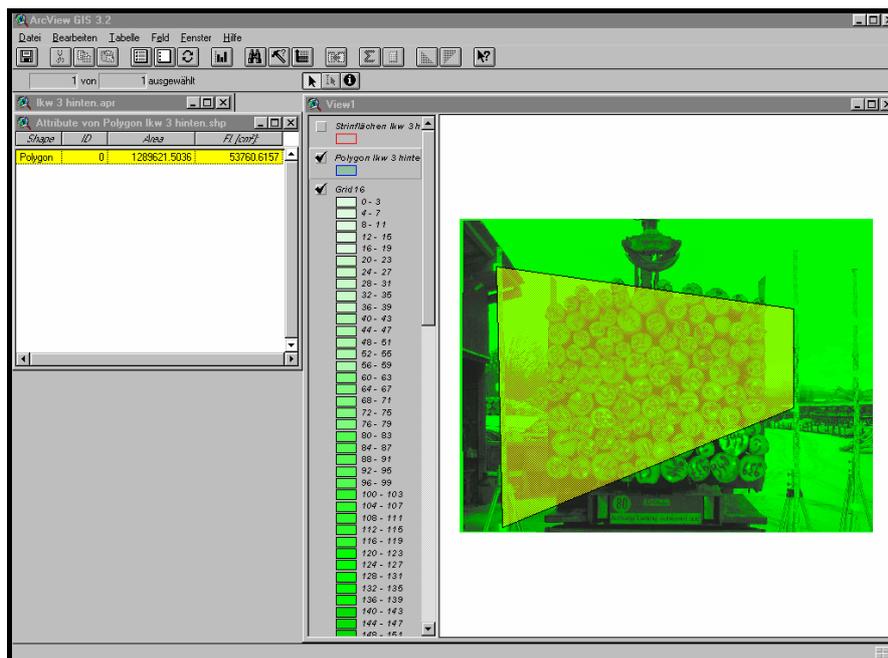


Abbildung 7: Ermittlung der Polygongröße in ArcView GIS 3.2

Die Stirnflächen wurden entsprechend dem prozentualen Fehler, der sich aus dem Vergleich der aus dem Bild ermittelten Polygonfläche und der realen Polygonfläche ergibt, korrigiert.

Die auf den Abschnitts Stirnflächen sichtbaren Farbnummern, die im Versuch ebenso wie die Information, ob Fuß- oder Zopfseite der Abschnitte auf dem Bild sichtbar sind, zuvor aufgesprüht wurden, wurden in eine Attributtabelle übernommen, um eine Verknüpfung mit den erhobenen Kontrolldaten durchführen zu können. Die Daten der Abschnitts Stirnflächen wurden anschließend nach *Microsoft® Excel* exportiert.

Zusätzlich wurden mit Hilfe eines *ArcView GIS 3.2* internen Skripts aus den Polygonzügen, mit denen die Stirnflächen umfahren wurden, als weitere Informationen ermittelt: Zum einen die Koordinaten der Punkte, die die Stirnflächenpolygonzüge aufspannen und zum anderen die Koordinaten der Schwerpunkte aller Stirnflächenpolygonzüge.

3.2.1.3.2 Automatisierte Verfahren

In diesem Kapitel werden Ansätze zur Automatisierung der Bildverarbeitungsroutine beschrieben, die Voraussetzung für die für Praxiszwecke angestrebte personalextensive und kostengünstige Dimensionsmaßermittlung der fotografierten Nadelrundholzabschnitte sind. Der arbeits- und zeitintensivste Bearbeitungsschritt innerhalb der zuvor beschriebenen manuellen Bildverarbeitungs- und -auswertungsroutine besteht in der Delinierung der Stirnflächen der Nadelrundholzabschnitte.

Eine automatisierte Delinierung der Stirnflächen erfordert, dass die Aufgabe der Bildinterpretation vom visuell arbeitenden Bildinterpreten auf das maschinelle Verarbeitungssystem übertragen wird.

Bildinterpretation

JÄHNE (2002) definiert Bilder als „[...] eine flächenhafte Verteilung der Bestrahlungsstärke in einer Ebene [...]“. Bilder werden auch als zweidimensionale Helligkeits- und Grauwertverteilungen beschrieben. Da Computer keine kontinuierlichen Bilder, sondern nur digitale Zahlenfelder verarbeiten können, müssen Bilder als zweidimensionale Punktfelder abgespeichert werden. Ein Pixel beschreibt einen Punkt dieses Punktfeldes und repräsentiert die Bestrahlungsstärke an der Punktfeldposition (JÄHNE, 2002).

Bilder enthalten Regionen einheitlicher Farb- und Helligkeitswerte. Nach DIEDERSHAGEN (2001) ergeben sich aus der charakteristischen Anordnung dieser Regionen Objekte. „Das Erkennen von Objekten und Objekteigenschaften beruht auf der Wahrnehmung von Konturen, Formen, Texturen (lokale Bildstrukturen, die in hohem Maße objektspezifisch sind), Helligkeits- und Farbunterschieden, Objektmustern usw.“ (ALBERTZ, 1999).

Ein Objekt kann auch dann vom Bildinterpreten als solches erkannt werden, wenn physikalische Größen wie die Wellenlänge, der Kontrast oder die Intensität in weiten Bandbreiten variieren, da das menschliche Gehirn beim Erkennen und Interpretieren von Objekten auf gespeicherte Merkmale zurückgreift (MALLOT, 2000).

In der Tat scheint für das menschliche visuelle System bei der Betrachtung der Fotos ein Erkennen der Nadelrundholzabschnitte zumeist problemlos möglich.

Neben den reinen spektralen Informationen im Bild kann das menschliche Gehirn offensichtlich anhand der auf dem Foto sichtbaren Texturen, Mustern (Rauhigkeit, Körnung, dissipative Strukturen) und Nachbarschaftsbeziehungen (BLASCHKE, 2001) eine Stirnfläche eines Nadelrundholzabschnittes als solche erkennen. Das Interpretieren von Mustern hängt also nicht nur von den objektiv gegebenen Signalfolgen ab, sondern setzt voraus, dass das menschliche Gehirn bereits Vorerfahrung mit den gegebenen Mustern gemacht hat (ALBERTZ, 1999). Der Betrachter filtert Zusammenhänge im Bild anhand einer Teilinformationsmenge des Bildes heraus. Kanten der Stirnflächen, die von anderen Stirnflächen verdeckt sind, werden aufgrund des sichtbaren Kantenverlaufs ergänzt. Dieser Vorgang wird amodale Ergänzung genannt (ALBERTZ, 1999).

Das „maschinelle Sehen“ des bildverarbeitenden Systems erfordert für die Identifizierung und Extraktion der interessierenden Objekte im Bild spezifische, auf die Objekte und deren Umgebung sowie auf einwirkende Außeneinflüsse entwickelte Bildverarbeitungsalgorithmen.

Hierfür müssen das menschliche Wissen und das Urteilsvermögen des Bildinterpreten in semantische Regeln der Bildverarbeitung und Mustererkennung gefasst werden (BLASCHKE, 2001).

Das Kernstück der für die Problemstellung dieser Arbeit zu entwickelnden Algorithmen besteht in der Erkennung der Stirnflächenkanten.

Kanten spielen in der Bildverarbeitung generell eine wichtige Rolle. „Die höchste örtliche Dichte von Informationen in Bildern tritt bei schneller Änderung der Intensität, d.h. an Kanten, auf.“ (SRINIVASAN ET AL, 1982). Soll ein Grauwert eines Pixels vorhergesagt werden, so wird dieser im Allgemeinen mit dem gewichteten mittleren Grauwert der Nachbarpixel geschätzt. An Kanten und vor allem an Konturkanten weichen die Schätzung und der tatsächliche Grauwert voneinander ab (MALLOT, 2000). Nach JÄHNE (2002) müssen Nachbarschaftsoperatoren zur Kantendetektion Grauwertveränderungen im Bild erfassen und Bereiche mit konstanten Grauwerten unterdrücken. Kantenbasierte Segmentierungsverfahren suchen im Bild nach starken Gradienten (Diskontinuitäten), wobei unterstellt wird, dass die Gradienten Segmentgrenzen darstellen (BLASCHKE, 2000).

Bildverarbeitungsverfahren, wie sie von MEYER (1995) zur summarischen Gesamtstirnflächenbestimmung von Holzpoltern entwickelt wurden, erreichen aufgrund der Inhomogenität des Rohstoffes Holz und der Lagerungsspezifika des Holzes (gegenseitiges Verdecken der Stirnflächen) ihre Grenzen. Das von ihm verwendete Verfahren der summarischen Grauwertanalyse setzt voraus, dass die Pixel der Abschnittsstirnflächen sich in ihrem mittleren Grauwert von den Pixeln des Hintergrunds unterscheiden. Die Stirnflächenpixel variieren jedoch in ihren Grauwerten z.B. aufgrund von Verschmutzungen der Stirnflächen, die sich bei der Holzernte und den Be- und Entladevorgängen im Bestand und an der Waldstraße ergeben, erheblich voneinander. Schlammverkrustungen, aber auch Verfärbungen infolge Pilzbefalls lassen Stirnflächen wie Zwischenräume der Abschnitte erscheinen. Überhängende Rindenstücke, die im Bereich der Stirnflächen bei den Be- und Entladevorgängen abplatzen, verdecken die Stirnflächen. Die Stirnflächen weisen aufgrund der überhängenden Rindenstücke andere Grauwerte als die Pixel der sichtbaren Holzkörper auf.

Die genannten Faktoren, die das beschriebene Verfahren der summarischen Grauwertanalyse an seine Grenzen stoßen lassen, überlagern auch den sichtbaren Kantenverlauf der Stirnflächen erheblich und erfordern an diese Störfaktoren angepasste bzw. zusätzliche Bildverarbeitungsalgorithmen.

Dabei sollen einzelne Pixel nicht allein aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften klassifiziert werden, sondern es sollen homogene Objekte über ihre Form und/oder Textur abgegrenzt werden (BLASCHKE, 2001). Zumeist werden dazu Verfahren der Segmentierung und der

Merkmalsgewinnung eingesetzt, um aus den Bildinformationen die relevanten Informationen zu gewinnen (ALBERTZ, 1999). Kontext- oder objektorientierte Verfahren, die Umgebungsparameter und Nachbarschaftsbeziehungen mit einbeziehen, arbeiten vor allem mit Bildsegmentierungsverfahren (BLASCHKE, 2001). „Die rechnergestützte Segmentierung unterteilt das digitale Bild in Bereiche (Segmente, räumlich zusammenhängende Mengen von Pixeln), die in der realen Welt eine Bedeutung haben.“ (BLASCHKE, 2000). Das Bild, das sich aus einer pixelbezogenen Klassifikation ergibt, wird auch als segmentiertes Bild bezeichnet. Die Segmente sind hierbei die Regionen, die aufgrund gleicher Klassenzugehörigkeit benachbarter Pixel zusammengefasst wurden (MATECKI, 2003).

Aktive Konturenmodelle

Aufgrund der dargestellten Stirnflächeneigenschaften wurden in Zusammenarbeit mit der Abteilung Mustererkennung und Bildverarbeitung des Instituts für Informatik der Universität Freiburg (Leiter: Prof. Dr. H. Burkhardt) Möglichkeiten einer Kantendetektion der Stirnflächen diskutiert. Im Rahmen einer medizinischen Untersuchung (CHENG ET AL., 2002) entwickelte ein Mitarbeiter der Abteilung Algorithmen für eine Anwendung, die für die Fotos der Holzladungen modifiziert wurde.

Grundlage für die Erkennung der Abschnittsstirnflächen stellen dabei Aktive Konturenmodelle (sog. „snakes“) (KASS ET AL., 1987) dar. Diese „snakes“ werden auf den Stirnflächen der Stammabschnitte gestartet und markieren nach ihrer Berechnung den Übergang von Stirnfläche zu Hintergrund und damit die Kante bzw. die Kontur der Stirnfläche. Die „snake“ passt sich den Objektgrenzen an.

Beim „snake“-Modell werden die Grenzen des zu segmentierenden Objektes als eine einzelne geschlossene Struktur angesehen. Dadurch werden Störfaktoren wie Lücken oder Irregularitäten der Objektgrenzen (z.B. Tangentialrisse an den Stirnflächen (Abbildung 8) oder seitliche Verschmutzungen auf den Stirnflächen) eliminiert (MISSAL, 2001).

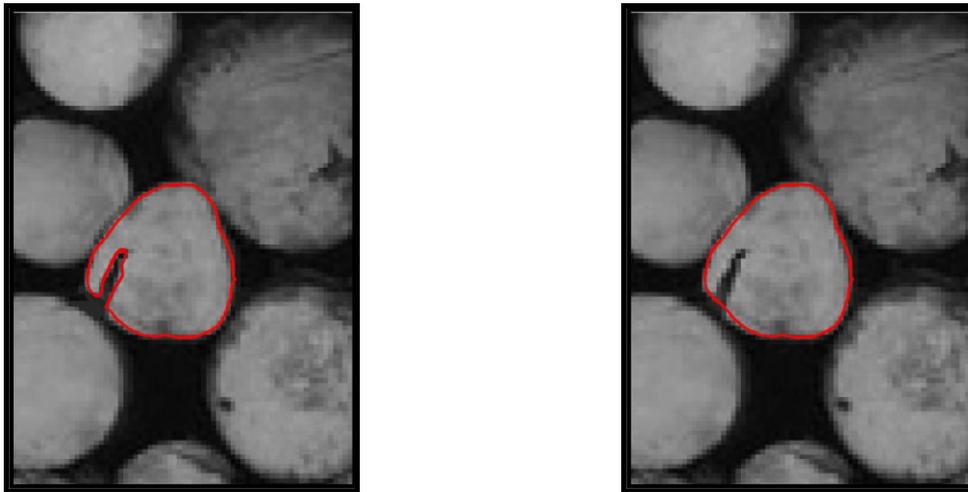


Abbildung 8: links: manuell delinierte Stirnfläche mit Tangentialriss; rechts: dieselbe mit Hilfe der „snake“-Funktion automatisiert delinierte Stirnfläche (Tangentialriss wird eingeschlossen)

Die Entwicklung und die mathematische Herleitung des „snake“-Modells werden eingehend von KASS ET AL. (1987) beschrieben.

Bildanalyseystem MVTec® Halcon

Ein zweiter Ansatz zur automatisierten Erkennung der Stirnflächen wurde mittels einer kommerziellen, industriellen Bildverarbeitungssoftware verfolgt, die über eine umfangreiche Bildverarbeitungsbibliothek verfügt und somit Zugriff auf eine große Bandbreite an Bildverarbeitungsoperatoren gewährt. Das Bildanalysepaket *HALCON 6.1* von *MVTec® Software GmbH* erfüllt diese Anforderungen mit Zugriff auf über 900 Operatoren zur Vorverarbeitung, Segmentierung, Merkmalsextraktion, Morphologie und Klassifizierung. Über eine Schnittstelle können eigene Applikationen in der Programmiersprache C++ in die Software eingebunden werden. Das Programm wurde auf einer Microsoft® Windows NT-Plattform installiert.

Eine Programmroutine zur automatisierten Erfassung der Stirnflächen wurde vom Softwarehersteller programmiert. Zusätzlich wurde ein weiteres Softwarepaket – *eCognition®* von *Definiens Imaging GmbH* – für diese Anwendung geprüft. Nach Angaben dieses Herstellers ist ein Programmmodul in Entwicklung, das eine Routineprogrammierung zur Stirnflächenerkennung erlaubt (Stand Ende 2002).

Die Funktionsweise der eingesetzten Bildverarbeitungsoperatoren wird nachfolgend skizziert. Die Beschreibungen entstammen dem Referenzhandbuch *C++ Syntax für HALCON 6.0.1* (2001).

Das Bild wird als RGB-Bild, das über die drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau verfügt, in das Programm eingelesen (Abbildung 9). Anhand der Funktion:

$$k = 0,299r + 0,587g + 0,144b \quad (7)$$

wird das RGB-Bild (dreikanalig) in ein Graubild (einkanalig) transformiert (Abbildung 10).



Abbildung 9: RGB-Bild der Stirnflächen, das in das Bildanalysepaket Halcon 6.1 eingelesen wurde

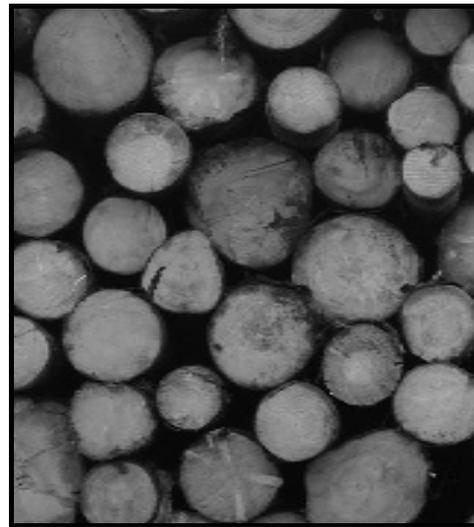


Abbildung 10: Transformiertes Graubild

Zur Verminderung des Grauertrauschens im Bild wird ein rekursiver Glättungsfilter eingesetzt (Abbildung 11). Dieser Filter verhindert bei der nachfolgenden Segmentierung eine zu große Anzahl an Regionen. Wenn das Bild feine Strukturen enthielte oder verrauscht wäre, entstünden bei der Segmentierung sehr viele Regionen. Die Pixelgrauwerte des Bildes werden nach $g' = 255 - g$ (8) mit $g = \text{Grauwert}$ invertiert (Abbildung 12).

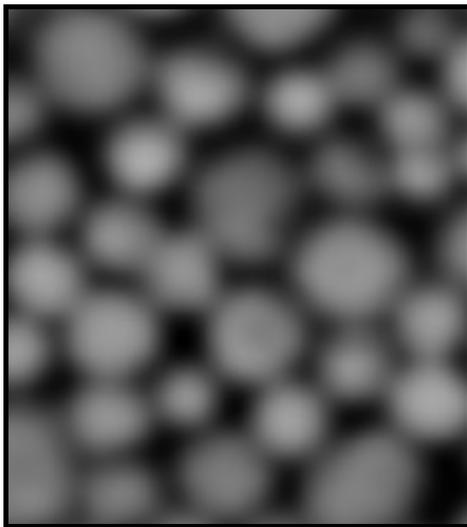


Abbildung 11: Bild nach Einsatz eines Glättungsfilters

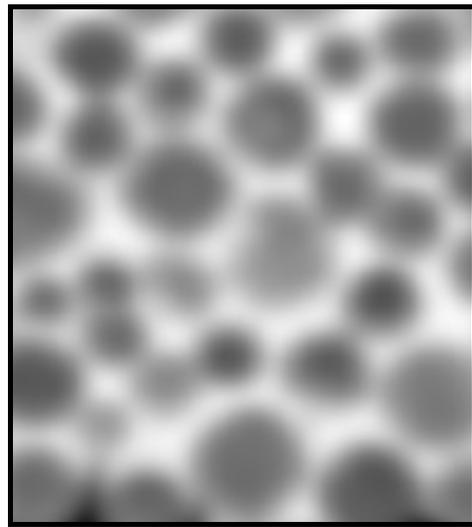


Abbildung 12: Invertiertes Grauwertbild

Es wird eine Segmentierung nach dem „Wasserscheiden“-Prinzip durchgeführt (Abbildung 13). Bei der Wasserscheidentransformation wird ein zweidimensionales Grauwertbild als topographisches Relief betrachtet. Hohe Pixelgrauwerte korrespondieren mit der Höhe von Bergen, niedrige mit Tälern. Mit der Wasserscheidentransformation können aus Objekten, die mehrere Objekte umschließen, individuelle Objekte identifiziert werden (MOËLL UND BORGEFORS, 2001).

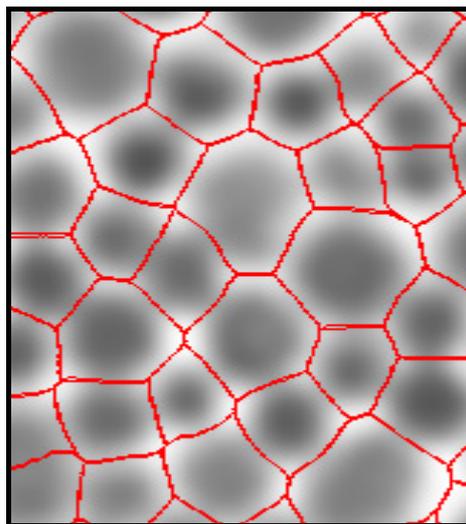


Abbildung 13: Wasserscheidentransformation; rote Linien stellen Wasserscheiden dar

Nach PALM ET AL. (2000) werden die Täler, die lokale Minima bezogen auf die Pixel darstellen, derart mit Wasser geflutet, dass der Wasserstand in allen Tälern gleich ist. Anschließend werden immer dann Dämme (Wasserscheiden) errichtet, wenn zwei mit Wasser gefüllte

Täler im nächsten Schritt verschmelzen würden. Wasserscheiden stellen somit die hellen Grate zwischen den dunklen Becken dar. Die dunklen Becken nehmen jeweils für sich in dem Bild eine eigene Region ein, alle Wasserscheiden stellen im Bild nur eine Region dar. Die ausgewählten Bereiche des Grauwertbildes werden mittels Schwellwerten aus dem Histogramm segmentiert (Abbildung 14).

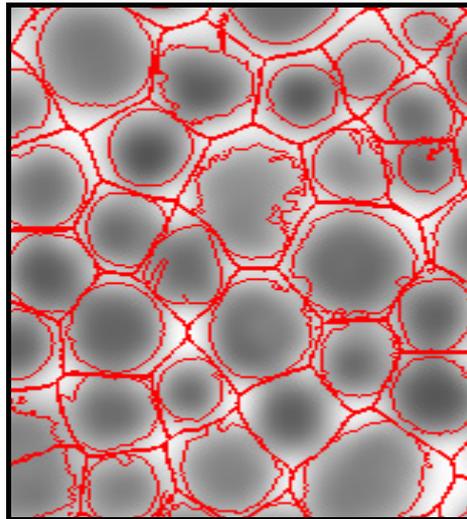


Abbildung 14: *Ergebnis einer mehrfachen Schwellwertoperation innerhalb eines jeden Beckens*

Schwellwertoperationen dienen der Trennung von Grauwerten und werden zur Unterscheidung zwischen Objekt und Hintergrund eingesetzt (LUHMANN, 2000). Der eingesetzte Operator führt eine Segmentierung mit einer mehrfachen Schwellwertbildung durch. Als Schwellwertgrenzen dienen neben den Grauwerten 0 und 255 die Minima, die aus einem relativen Histogramm abgeleitet werden. Die resultierenden Intervalle werden durch je eine Region repräsentiert. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass die gesuchten Regionen homogene Grauwerte aufweisen. Anschließend werden die Hohlfächen in den Regionen aufgefüllt und die Regionen ausgewählt, die über eine ähnliche Gestalt wie die vom Nutzer vorgegebene Form (hier: die größte Region) verfügen. Nach Durchführung dieser Operation wird das Bild mit den delinierten Stirnflächen ausgegeben (Abbildung 15).

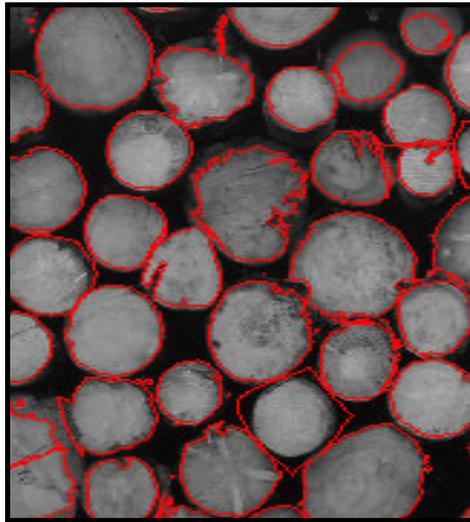


Abbildung 15: Ausgabe der delinierten Stirnflächen

3.2.2 Dreidimensionales (stereo-photogrammetrisches) Aufnahmeverfahren

Zur Kontrolle der Abschnittsstirnflächen, die im zweidimensionalen foto-optischen Verfahren ermittelt werden, wird ein dreidimensionales foto-optisches Verfahren eingesetzt, und zwar die Nahbereichs-Stereo-Photogrammetrie.

Beim Transport auf dem Lkw oder bei der Lagerung im Wald werden einzelne Rundholzabschnitte bezogen auf das Polter nicht bündig gelagert, da sie beim Abladen nach dem Öffnen der Kranzange an eine – bezogen auf das Polter – vor- oder zurückversetzte Position – rutschen. Diese vor- und zurückversetzte Position der Abschnitte wird aus Zeit- bzw. Kostengründen vom Maschinenführer meistens nicht korrigiert.

Stirnflächen von Abschnitten, die vor oder hinter der Maßstabsebene liegen, werden bei vorgezogener Lage zu groß, bei zurückversetzter Lage zu klein dargestellt (vgl. Anhang Abbildung 35).

Zunächst sollen mit diesem Verfahren mögliche Flächenunterschiede aufgedeckt werden, die sich bei der Auswertung der Abschnittsstirnflächen anhand des zweidimensionalen Fotos ergeben können, da die Abschnitte nicht exakt bündig gepoltet sind. Ein Flächenunterschied zwischen einer Abschnittsstirnfläche, die aus dem Digitalbild ermittelt wird, und der realen Abschnittsstirnfläche wird also dann erwartet, wenn die Abschnitte im Polter nicht bündig gelagert werden und sich bei der Bildnahme des Polters eine zurück- bzw. vorversetzte Position der Abschnittsstirnflächen zum ins Bild eingebrachten Maßstab ergibt. Diese Position einer Abschnittsstirnfläche zum Maßstab führt bei der Bildauswertung mittels Bildmaßstab zur fehlerhaften Berechnung der Abschnittsstirnfläche.

Das stereo-photogrammetrische Verfahren ermöglicht eine entfernungsunabhängige Vermessung von Bildobjekten innerhalb eines Bildes. Der Position der Abschnittsstirnflächen zum Maßstab kommt beim stereo-photogrammetrischen Verfahren keine Bedeutung zu.

Unter Photogrammetrie werden Methoden verstanden, bei denen aus einem oder mehreren Bildern eines Objektes indirekt dessen Form, Größe und Lage durch Bildmessung und Bildinterpretation gewonnen werden (LUHMANN, 2000; SCHAFMEISTER, 2000). Das Ergebnis einer photogrammetrischen Vermessung ist eine exakte dreidimensionale geometrische Rekonstruktion eines Objektes.

Die Nahbereichsphotogrammetrie ist ein Teilbereich der Photogrammetrie. Diese wird begrifflich vor allem nach dem Aufnahmeort und der -aufnahmeentfernung (z.B. Luftbildphotogrammetrie und Nahbereichsphotogrammetrie), der Anzahl der auszuwertenden Bilder (z.B. Einbild-Photogrammetrie und Stereo-Photogrammetrie) und der Aufnahme- und Auswertemethode (z.B. Analytische Photogrammetrie und Digitale Photogrammetrie) eingeteilt (LUHMANN, 2000).

Bei der Stereo-Photogrammetrie erfolgt die Vermessung des Objektes bei dreidimensionaler Betrachtung zweier Bilder. Dabei ist die perspektivische Verschiedenheit der Netzhautbilder eine wesentliche Voraussetzung für die Empfindung der räumlichen Gestalt (REIDELSTÜRZ, 1997). Durch vergrößernde Systeme und eine Erweiterung der Aufnahmebasis (Distanz der beiden Aufnahmepunkte voneinander) ist der Betrachter in der Lage, über das menschliche Tiefenunterscheidungsvermögen hinaus stereoskopisch zu sehen (REIDELSTÜRZ, 1997 nach MÜLLER, 1931; MANEK, 1950; KONEČNY UND LEHMANN, 1984). Aus diesem Grund können stereoskopische Aufnahmen für hochpräzise Vermessungen eingesetzt werden.

3.2.2.1 Bildaufnahme

In diesem Kapitel werden die Kamera, die Beleuchtung, das Aufnahmeverfahren, der Maßstab und die Bildvorverarbeitung der stereo-photogrammetrischen Bildaufnahme beschrieben.

Kamera

In dieser Untersuchung wurde eine *Seagull 6x6* Sucherkamera mit einem fest eingebauten „Haiou“-Objektiv (75 mm, 1:3,5) zur Fotonahme eingesetzt. Diese Teilmesskammer, die auch REIDELSTÜRZ (1997) in seiner Untersuchung einsetzte, verfügt über eine Réseauglasplatte mit Réseaukreuzen in einem Abstand von 5 mm. Die Kreuze werden auf das Bild belichtet und bei der Auswertung vermessen. Durch die Einmessung der Réseaukreuze bei der Orientierung der Bilder wird ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Dabei wird die gemessene Lage

der Réseaukreuze auf dem fotografierten Bild mit den Daten aus der Kammerkalibrierung verbunden und mit der Soll-Lage der Réseaukreuze aus dem Auswertungsprogramm verglichen. Nach SCHAFMEISTER (2000) lassen sich durch diesen Vergleich Filmdeformationen (Nichtplanlage des Films bei der Belichtung, Drehung oder Schrumpfung bei der Entwicklung) kompensieren.

Der Fokus der Mittelformatkamera wurde nachträglich mit Kunstharz fixiert. Eine Kalibrierung wurde im Photogrammetrielabor der FH Würzburg durchgeführt (REIDELSTÜRZ, 1997) (vgl. Anhang 12.3).

Als Filmmaterial für die Aufnahme der Polter bzw. der Holzladungen wurde der Schwarz-Weiß-Diafilm *Scala 200x ISO 200/24° Professional 120* der Marke AGFA mit 12 Bildern je Film verwendet. Diese Filme wurden von dem Fachlabor für Berufsphotographie in Stuttgart als rahmenloses Mittelformat-Dia entwickelt. Der Filmtransport während der Aufnahmen der Polter und der Lkw-Holzladung erfolgte bei der Kamera vom Typ *Seagull* manuell.

Beleuchtung

Bei der photogrammetrischen Bildnahme wurde auf ein zusätzliches Beleuchtungsmittel verzichtet. Da die *Seagull 6x6* keine Belichtungsautomatik besitzt, wurde ein Belichtungsmesser eingesetzt. Eine leichte Unterbelichtung wirkte sich dabei positiv auf die Detailgenauigkeit der Objekte aus.

Aufnahmeverfahren

Beim stereo-photogrammetrischen Verfahren werden zwei Aufnahmen angefertigt. Der Abstand zwischen den beiden Projektionszentren der beiden Aufnahmen, die von einem Objekt angefertigt werden, heißt Basis. Das Basisverhältnis ist das Verhältnis zwischen der Aufnahmebasis zur Aufnahmeentfernung (REIDELSTÜRZ, 1997). Nach Abbildung 16 ist dies die Entfernung zwischen O' und O'' .

Um eine ausreichende Messgenauigkeit zu erreichen, richtet sich die Basis nach der Entfernung zum Objekt. REIDELSTÜRZ (1997) und leitet geeignete Basisverhältnisse für forstliche Anwendungen der terrestrischen Photogrammetrie her. In dieser Untersuchung wurde ein Basisverhält-

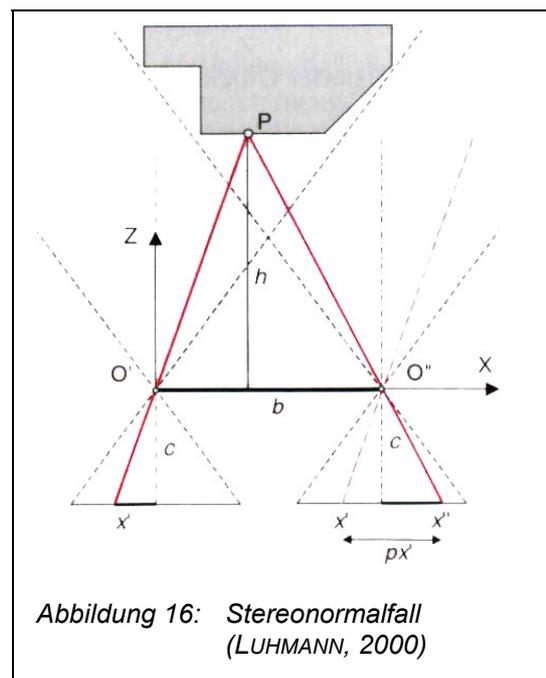


Abbildung 16: Stereonormalfall (LUHMANN, 2000)

nis von 1:5 verwendet. Durch dieses Basisverhältnis ergibt sich bei den beiden Bildern eine Überlappung des Objektes von etwa 60 bis 80 Prozent. Bei einer Entfernung von 10 Metern zum Objekt errechnet sich ein Basisabstand von 2 Metern, bei einer Entfernung von 12 Metern einer von 2,4 Metern. Durch dieses Basisverhältnis ergibt sich bei den Poltern im Wald und bei den Holzladungen auf dem Lkw die höchstmögliche Detailgenauigkeit.

Für stereo-photogrammetrische Aufnahmen wurden je nach Poltergröße Entfernungen zwischen 10 und 12 Meter gewählt.

Bei den stereo-photogrammetrischen Aufnahmen wurde wie bei den digitalen zweidimensionalen Aufnahmen der Mittelpunkt des Polters bzw. der Holzladung markiert und von diesem Punkt die Aufnahmedistanz eingemessen. Bei der Bildnahme wurden parallele Aufnahmerichtungen gewählt und versucht, verschwenkte und konvergente Stereokonfigurationen zu vermeiden. Der halbe Basisabstand wurde in der ermittelten Aufnahmedistanz (10 oder 12 Meter) parallel zum Polter nach rechts und nach links (1 bzw. 1,2 Meter) eingemessen. Diese beiden Punkte wurden als Aufnahmeorte für die stereo-photogrammetrische Bildaufnahme gewählt.

Maßstab

Für die stereo-photogrammetrischen Modelle wurden die Passpunktkoordinaten des in Kapitel 3.2.1.1 beschriebenen Passpunktsystems verwendet.

Bildvorverarbeitung

Die stereo-photogrammetrischen Aufnahmen wurden zur Auswertung in einem analytischen Plotter P3 der Firma ZEISS in der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg orientiert. Dabei werden die drei Schritte der inneren, relativen und absoluten Orientierung unterschieden.

Die *innere Orientierung* definiert das Bildkoordinatensystem und korrigiert unvermeidbare Kamerafehler (REIDELSTÜRZ, 1997). Dazu werden nach Eingabe der Kameravariablen definierte Resésaukreuze angefahren und eingemessen.

Die *relative Orientierung* eines Stereobildpaares dient der Wiederherstellung der Aufnahmekonstellation der Wirklichkeit. Dabei wird die Rotation und räumliche Translation eines Bildes zu seinem Bildpartner in einem gemeinsamen lokalen Modellkoordinatensystem beschrieben (REIDELSTÜRZ, 1997; LUHMANN, 2000). Hierzu wurden mindestens sechs regelmäßig verteilte Punkte (GRUBER-Punkte) auf beiden Bildern zur Übereinstimmung gebracht.

Die *absolute Orientierung* dient der Transformation des in der relativen Orientierung bestimmten Modellkoordinatensystems in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem

(LUHMANN, 2000). Dazu werden die vermessenen Passpunkte des beschriebenen Maßstab-systems in das verarbeitende System eingespielt und eingemessen.

„Nach einer inneren, relativen und absoluten Orientierung der Bildpaare ist eine Verknüpfung mit einem räumlichen System hergestellt. Durch Einblenden einer Messmarke in jedes der beiden Bilder ist diese tiefenwahrnehmbar, so dass es möglich wird, durch eine steuerbare Veränderung von deren Parallaxen exakte Koordinatenmessungen vorzunehmen.“ (REIDELSTÜRZ, 1997).

3.2.2.2 Bildverarbeitung

Die Abschnittsstirflächen werden mittels einer Polygonfunktion umfahren und markiert. Die Markierungen der Abschnittsstirflächen wurden in der Software *MicroStation*® am PC dargestellt und gespeichert. Mit der Software ist es möglich, die Stirflächen der Abschnitte im Polter oder in der Holzladung aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten (Abbildung 17).

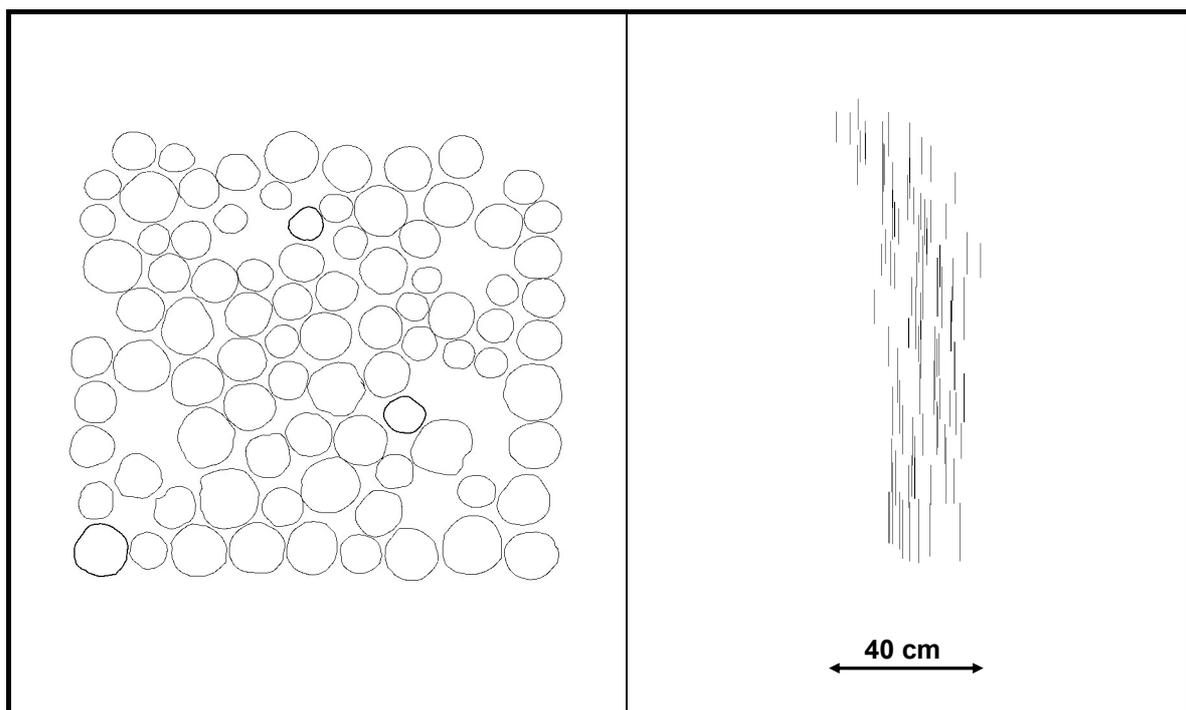


Abbildung 17: Frontalansicht (links) und seitliche Ansicht (rechts) von Stirflächen einer Lkw-Holzladung in der CAD Software *MicroStation*. Die nicht-bündige Polterung ist erkennbar.

Die ermittelten Daten der Polter und Holzladungen wurden als „.dgn“-Dateien für eine Weiterbearbeitung in *ArcView GIS 3.2* und *Microsoft® Excel* gespeichert.

Der 3D-Viewer von *ArcView GIS 3.2* erlaubt eine Darstellung der Stirnflächen in Abhängigkeit von deren Aufnahmeentfernung. Die hellbraun angefärbten Stirnflächen liegen weiter von der Kamera entfernt als die dunkelbraun angefärbten Stirnflächen (Abbildung 18).

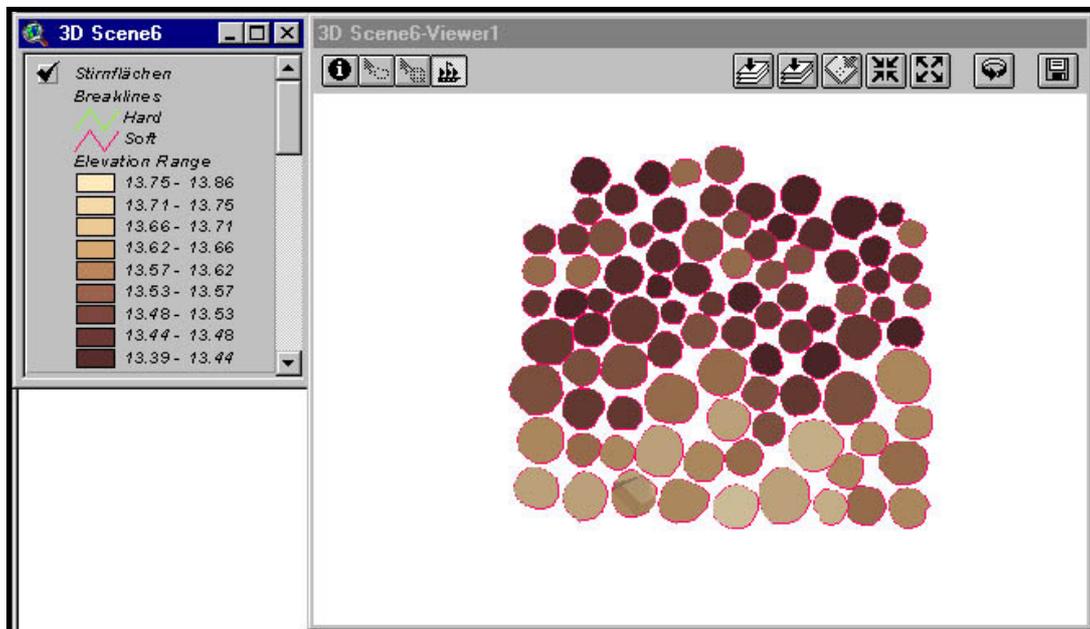


Abbildung 18: Darstellung der Abschnitts Stirnflächen in Abhängigkeit von ihrer Aufnahmeentfernung

Die für einen Genauigkeitsvergleich notwendige Zusammenführung der Daten der stereophotogrammetrischen Auswertung mit den Daten, die aus den digitalen zweidimensionalen Fotos ermittelt wurden, erforderte eine gemeinsame Zuordnungsvariable – hier die Abschnittsnummer. Dazu wurden die Polygonzüge der Abschnitts Stirnflächen der stereophotogrammetrischen Auswertung mit den Digitalbildern, die mittels einer „world“-Datei in *ArcView GIS 3.2* georeferenziert wurden, verschnitten.

3.3 Stirnflächenklassifikation

Die Stirnflächen der Nadelrundholzabschnitte besitzen eine Form, die oftmals stark von einer geometrisch regelmäßigen Form, wie etwa eines Kreises oder einer Ellipse, abweicht. Die Form der Stirnflächen wird im beschriebenen foto-optischen Verfahren durch die Delinierung der Stirnflächen nachgezeichnet. Im Gegensatz zu dieser vollständigen Formerfassung wird bei den Vergleichsverfahren (Kluppe, Harvester, Werkeingangsvermessung) die Form der Stirnflächen über maximal zwei Durchmesser bzw. über die Durchmesserdifférenz beschrieben. Der Informationsgehalt über die Stirnflächenform ist also gegenüber dem foto-optischen Verfahren geringer.

Aufgrund der unterschiedlichen Verfahren der Messwerterhebung werden die Flächengrößen der Stirnflächen variieren. Die auf Basis der Stirnflächen vorhergesagten Abschnittsvolumina werden sich entsprechend dieser Stirnflächendifferenzen ebenfalls unterscheiden. Die Flächen- und Volumenunterschiede sind auf die Form der Stirnflächen zurückzuführen.

Aus diesem Grund sollen die Formen der Stirnflächen klassifiziert werden, um auftretende Flächen- und daraus resultierende Volumenunterschiede erklären zu können.

3.3.1 Visuelle Klassifikation der Stirnflächenformen

Die visuelle Ansprache der Stirnflächenform erfolgte an 1871 Stirnflächen, die in den Felduntersuchungen an der Waldstraße und am Werkseingang foto-optisch erfasst wurden. Die Stirnflächen wurden vom Verfasser gutachtlich visuell wie folgt angesprochen und in die drei Formklassen eingeordnet.

- „*runde Stirnflächen*“: Dieser Klasse wurden Stirnflächen zugeordnet, die kreisförmig oder annähernd kreisförmig sind.



Abbildung 19: runde Stirnfläche

- „*unrunde Stirnflächen*“: Stirnflächen, bei denen zwei in ihrer Länge voneinander stark abweichende Halbachsen vom Stirnflächenmittelpunkt zur Stirnflächenkante konstruiert werden können.



Abbildung 20: unrunde Stirnfläche

- „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“: Stirnflächen, die über einen sichtbaren Wurzelanlauf verfügen.



Abbildung 21: Stirnfläche mit Wurzelanlauf

3.3.2 Mathematische Klassifikation der Stirnflächenformen

Im Hinblick auf eine automatisierte Verfahrensroutine für eine Volumenschätzung sollte die Stirnflächenform der Stammabschnitte nicht nur vom Benutzer visuell eingeschätzt werden, sondern anhand von mathematischen Parametern, die aus der Form der Stirnfläche hergeleitet werden, ermittelt werden.

Benötigt werden also Musterformen, denen die Stirnflächen zugeordnet werden können.

Die Kontur der Stirnfläche kann nach BURKHARDT (2002) als eine Zusammensetzung von unregelmäßigen Schwingungen interpretiert werden, die aus Haupt- und Oberschwingungen besteht.

Das Amplitudenspektrum dieser Schwingungen kann mit Fourierkoeffizienten (FK) beschrieben werden. Diese Fourierkoeffizienten werden aus einer Fourierreihe ermittelt (vgl. Anhang 12.5).

Anhand des Amplitudenspektrums und der FK lässt sich feststellen, welche Idealschwingungen die ursprüngliche Schwingung erzeugt.

Aus den Fourierkoeffizienten können lage- und größeninvariante Fourierdeskriptoren (FD) abgeleitet werden (vgl. Anhang 12.5).

Es wird geprüft, ob sich mit Hilfe des Amplitudenspektrums, das sich anhand der Fourierdeskriptoren für ähnliche Stirnflächenkonturen unabhängig von deren Lage und Größe ergibt, ähnliche Musterklassen von Profilen für die Stirnflächenkonturen ausscheiden lassen. Dabei sollen die zunächst visuell-gutachtlich unterschiedenen Stirnflächenkonturen (rund, unrund und Wurzelanlauf) hinsichtlich ihrer Amplitudenspektren auf charakteristische Gemeinsamkeiten untersucht werden. Die Amplitudenspektren stellen die Beträge der ermittelten Fourierdeskriptoren dar. Sie werden für diesen Vergleich in Form von Periodogrammen aufgetragen. Es wird zusätzlich geprüft, ob anhand der Anzahl der Fourierdeskriptoren,

die benötigt werden, um einen festgesetzten Schwingungsanteil der Spektren zu erklären, eine Klassifizierung der Stirnflächenkonturen durchgeführt werden kann.

Die dargestellten Berechnungen der Fourierkoeffizienten und der Fourierdeskriptoren wurden mit der *Software Matlab® 6.5.0.1* von *The MathWorks, Inc.* durchgeführt.

Der Fourierkoeffizient c_1 oder c_{-1} , der die Grundstruktur einer kreis-ähnlichen Stirnfläche bildet und eine „best-approximation“ an die Stirnflächenkontur darstellt, wird als Radius verwendet, um eine optimierte Stirnfläche zu berechnen. Anhand der optimierten Stirnflächen werden folgende Variablen errechnet:

- s^2res : Die Koordinaten des ursprünglichen Polygonzugs einer Stirnflächenkontur (Sk) werden mit den Koordinaten des Polygonzugs, der sich aus dem Fourierkoeffizienten c_{-1} ergibt, über deren Fehlervarianzen s^2res miteinander verglichen. Folgende Gleichung wird für diese Berechnung eingesetzt:

$$s^2res = \frac{\sum (y_{Ursprung} - y_{Fourier})^2 + (x_{Ursprung} - x_{Fourier})^2}{N - 1} \quad (9),$$

mit $(x/y)_{Ursprung}$ = (x/y)-Koordinaten des ursprünglichen Polygonzugs der Sk
 und $(x/y)_{Fourier}$ = (x/y)-Koordinaten des aus dem FK c_{-1} ermittelten Sk

- Über- und Unterschätzung: Die Koordinaten des ursprünglichen Polygonzugs werden mit den Koordinaten des aus dem Fk c_{-1} ermittelten Polygonzugs direkt anhand der Formel:

$$\sum (y_{Ursprung} - y_{Fourier}) + (x_{Ursprung} - x_{Fourier}) = 0 \quad (10)$$

miteinander verglichen. Dabei werden die Koordinaten auf einen systematischen Bias überprüft.

Es wird weiterhin untersucht, ob sich die beiden beschriebenen Variablen für eine Stirnflächenklassifikation eignen.

Darüber hinaus wird geprüft, ob zwischen ausgesuchten Variablen, die aus der Fläche, dem Umfang und dem minimalen und maximalen Radius der Stirnflächen errechnet werden, und der visuellen Klassifikation der Stirnflächen ein Zusammenhang nachgewiesen werden kann.

3.4 Stirnflächenoptimierung

Anhand der foto-optisch ermittelten Stirnflächen der Rundholzabschnitte sollen die zugehörigen Abschnittsvolumina geschätzt werden. Es wird erwartet, dass die Genauigkeit der Abschnittsvolumenprognose anhand der Stirnflächen in Abhängigkeit von der Stirnflächenform steht, da sich die dargestellten Stirnflächenformen entlang der Längsachse des Abschnittes formspezifisch verändern.

Diese Veränderung tritt an einem Erdstammabschnitt mit Wurzelanlauf besonders deutlich hervor. Die Stirnfläche der Fußseite ist stark vergrößert und verjüngt sich innerhalb des ersten Meters entlang der Längsachse des Abschnittes. Neben der Größe der Stirnfläche verändert sich die Form der Stirnfläche, die an der Fußseite oftmals einen welligen Verlauf aufweist. Nach etwa einem Meter geht die Stirnfläche in eine annähernd kreisrunde bzw. ovale Form über. Aus diesem Grund folgt aus einer Stirnfläche, die durch Wurzelanläufe vergrößert ist, kein entsprechend größeres Abschnittsvolumen, da die ermittelte Fläche entlang der Abschnittslängsachse nicht entsprechend einer durchschnittlichen Abholzigkeit abnimmt. Das Maß des statistischen Zusammenhangs zwischen Stirnfläche und zugehörigem Abschnittsvolumen, das für die Abschnittsvolumenschätzung herangezogen wird, ist aufgrund des beschriebenen unregelmäßigen Verlaufs der Stirnfläche kleiner.

Aus diesem Grund wurden für jene Abschnitte, die eine Fußstirnfläche mit unregelmäßigem Verlauf der Stirnflächenform aufwiesen, Stirnflächen gesucht, die das zugehörige Abschnittsvolumen genauer vorhersagen.

Diese in Bezug auf die Volumenschätzung „optimierenden“ Stirnflächen wurden geometrisch aus den foto-optisch ermittelten Stirnflächen hergeleitet. Dazu wurden aus den Daten der manuellen Bildauswertungsroutine (vgl. Kapitel 3.2.1.3.1) folgende zusätzliche Stirnflächenvariablen ermittelt:

- der minimale, mittlere und maximale Radius der Stirnflächen (Abbildung 22)

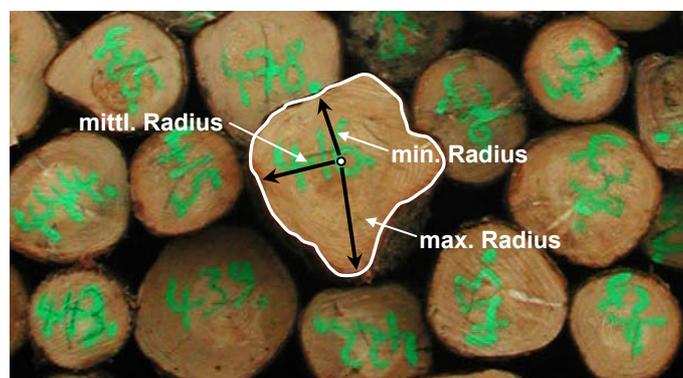


Abbildung 22: Stirnfläche mit minimalem, mittlerem und maximalem Radius

- die zum minimalen, mittleren und maximalen Radius der Abschnittsstirnfläche zugehörige Kreisfläche
- der Stirnflächen umschließende Polygonzug, der aus vier Ellipsenbögen zusammengesetzt ist

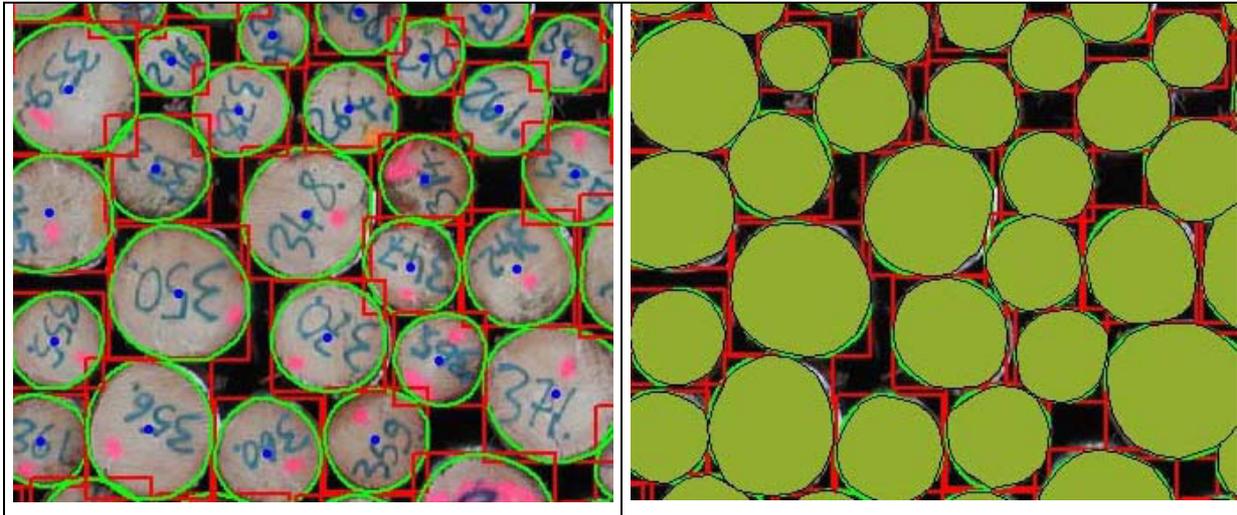


Abbildung 23: links: aus vier Ellipsenbögen konstruierter Polygonzug mit umschließenden Rechteck; rechts: Vergleich dieser konstruierten Polygonzüge mit den manuellen markierten Stirnflächen

Dieser aus vier Ellipsenbögen zusammengesetzte Polygonzug wurde wie folgt konstruiert: Anhand einer doppelten (horizontalen/vertikalen) virtuellen Kluppung der Stirnflächen wurden vier Kluppenaufsatzpunkte ermittelt. Mit Hilfe dieser Punkte wurde ein Rechteck konstruiert, das die Stirnfläche einschloss und an den Kluppenaufsatzpunkten die Stirnfläche tangierte. An den Tangenten wurden im rechten Winkel vier Halbachsen konstruiert. Zwischen jeweils zwei benachbarten Kluppenaufsatzpunkten wurden mit Hilfe der Ellipsenformel und den konstruierten Halbachsen Ellipsenbögen ermittelt und zu einem Polygonzug zusammengesetzt. Über den Polygonzug wurde die Stirnfläche ermittelt.

3.5 Vergleichsmessungen

Als Vergleich für die Daten der foto-optischen Vermessungsverfahren wurden Dimensionsmaße, die bei Vermessungsverfahren aus der forstlichen Praxis ermittelt wurden, eingesetzt.

3.5.1 Dimensionsmaßermittlung bei der vollmechanisierten Holzernte mittels Harvester

Die Vergleichsdimensionsdaten der Rundholzabschnitte wurden mit einem Harvester der Firma *Caterpillar* mit der Typenbezeichnung CAT 580, ausgerüstet mit einem Bordcomputer des Typs *DASA 380*, erhoben. Zu den erhobenen Daten zählen die Anzahl der Abschnitte je

Stamm, der Durchmesser an der Fußseite, die Durchmesserabnahme in 10 cm Sektionen, der Durchmesser an der Zopfseite, die Länge der Abschnitte und die Volumina der Abschnitte.

Vor Beginn der Aufarbeitung wurden Kontrollmessungen zur Überprüfung der Messgenauigkeit des Harvesters durchgeführt. Zum späteren Vergleich der abschnittsweise erhobenen Dimensionsmaße mit den Maßen der foto-optischen Vermessung wurden die Stammabschnitte entsprechend ihrer Aufarbeitungsreihenfolge mittels Plastikplättchen an einer Stirnseite fortlaufend nummeriert.

Aus den zu den Abschnittsenden (Zopf und Fuß) zugehörigen Durchmessern, die bei der Harvestervermessung erhoben wurden, konnten für die Abschnitte jeweils zwei Abschnittsflächen über die Kreisflächenformel errechnet werden.

Die Datenübertragung der „.stm“-Dateien vom Bordcomputer auf ein Notebook erfolgte über eine RS-232-Schnittstelle mittels KERMIT-Protokoll.

Zur Datenzusammenführung wurden die Daten des Bordcomputers mit den Abschnittsnummern, die auf den Abschnitten angebracht waren, verknüpft.

3.5.2 Dimensionsmaßermittlung bei der opto-elektronischen Vermessung am Werkseingang (WEV)

Als Vergleichsdaten wurden im Rahmen einer Werkeingangsvermessung (WEV) sowohl die opto-elektronisch gemessenen Dimensionsdaten als auch die nach den Regeln der forstlichen Sortierüberprüfung ermittelten Dimensionsdaten erhoben. Die Vermessung der Nadelrundholzabschnitte erfolgte nach ihrer Entrindung.

Bei der opto-elektronischen Werkeingangsvermessung wurden die Daten, die in einem „Durchmesserprotokoll“ und einem „Einzelstammprotokoll“ abgelegt wurden, gespeichert.

Das Durchmesserprotokoll beinhaltet neben den kreuzweise ermittelten, ungerundeten Durchmessern in mm, die in 25 cm-Intervallen entlang der Stammachse beginnend am Fuß des Abschnittes bei der Länge 0 cm erfasst werden, auch die daraus abgeleiteten HKS-konformen Durchmesser.

Das Einzelstammprotokoll, das standardmäßig für jede im Werk eintreffende Holzfuhrer erstellt wird, enthält für jeden Stamm bzw. Abschnitt die Laufnummer, die Baumart, die Stärkeklasse, die Qualität, die Abholzigkeit, die exakte Stammlänge, die HKS-konforme Länge, die HKS-konform ermittelten Durchmesser und das Verkaufsvolumen, das ebenfalls HKS-konform berechnet wird.

Zur einzelabschnittswisen Zuordnung der erhobenen Dimensionsdaten wurden die Abschnittsnummern entsprechend dem Durchlauf der Abschnitte durch die Vermessungsan-

lage notiert. Zusätzlich wurden die auf den Stirnseiten angebrachten Abschnittsnummern mit einer Videokamera dokumentiert, um eine zweifelsfreie Zuordnung der Dimensionsdaten zu den Abschnitten zu gewährleisten.

Aus den Durchmesserdaten der Werkeingangsvermessung (WEV) wurde für das Fuß- und Zopfende aller Abschnitte jeweils eine zugehörige Abschnittsstirnfläche ermittelt. Dazu wurden die beiden erhobenen Durchmesser gemittelt und über die Kreisflächenformel die Abschnittsstirnfläche errechnet.

Die Daten der opto-elektronischen Werkeingangsvermessung wurden bei der Ergebnisbetrachtung als Referenzdaten genutzt, da die Werkeingangsvermessung als die exakteste Art der Dimensionsermittlung gilt (DFWR/VDS, 1994).

3.5.3 Durchmesserermittlung durch manuelle Rundholzvermessung

Mit der elektronischen Kluppe *Datafox* der Firma *PAV* wurden die Mittendurchmesser der Nadelrundholzabschnitte in Rinde im Bestand nach der Harvesteraufarbeitung kreuzweise gekluppt, beim Vorversuch auf dem Zwischenlagerplatz in Karlsruhe im Rheinhafen aus technischen Gründen jedoch nur einfach gekluppt. Bei der HKS-konformen Berechnung der Abschnittsvolumina aus den gekluppten Mittendurchmessern wurde ein pauschaler Rindenabzug von einem Zentimeter angesetzt.

3.6 Versuchsdurchführung

In den durchgeführten Labor- und Feldversuchen wurde schwerpunktmäßig bestimmten Detailfragen nachgegangen, für deren Analyse sich der jeweilige Versuchsaufbau besonders eignete. Aufgrund der Erkenntnisse aus den ersten Teiluntersuchungen wurde der Versuchsaufbau für die weiteren Untersuchungsschritte bei Bedarf modifiziert. Die Einzeluntersuchungen lassen sich wie folgt charakterisieren.

3.6.1 Laborversuche

Die Laborversuche unter Standardbedingungen wurden in zwei Einzeluntersuchungen durchgeführt.

Zu Beginn der Untersuchung wurden im Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft die Kameraparameter der Digitalkamera, die Aufnahmebedingungen, die Objektentfernungen, die Beleuchtungsmittel und die Bildqualität, mit der die Abschnittsstirnflächen mit der Digitalkamera abgebildet werden können, geprüft und für die weiteren Untersuchungen festgelegt (vgl. Kapitel 3.2.1.1).

In der zweiten Laboruntersuchung, die in einer Halle der Universität Freiburg am Flugplatzgelände in Freiburg erfolgte, wurden Versuche zur Lage der aufgenommenen Objekte zum Maßstab und zur Kamera durchgeführt. Als Objekte dieser Untersuchung wurden zum einen Normkörper (DIN A4-Kartonagen) und zum anderen 14 Fichten-Rundholzabschnitte gewählt.

Anhand der zweidimensional foto-optisch aufgenommenen Normkörper wurde geprüft, welche Auswirkungen eine zum Maßstab und somit zur Kamera zurück- und vorversetzte Lage der Körper unter den gegebenen Aufnahmebedingungen auf die Flächengröße der Körper, die auf dem Foto abgebildet werden, hat (Abbildung 24). Dazu wurde der Maßstab in einer Entfernung von 10 m zur Kamera aufgestellt und die Normkörper in 10 cm-Intervallen in Kameraentfernungen von 9,20 m bis 10,80 m positioniert.



Abbildung 24: Versuchsaufbau der vor- und zurückversetzten Normkörper

Die Normkörper wurden zusätzlich mit einer höherauflösenden Kamera – einer *Nikon Coolpix 5700* mit einer maximalen Auflösung von 5 Mio. Pixeln – aufgenommen. Diese Aufnahmen wurden verfahrensgleich ausgewertet und den ausgewerteten Aufnahmen der *Nikon Coolpix 990* gegenübergestellt.

14 Fichten-Rundholzabschnitte wurden ebenfalls zur Überprüfung der Auswirkungen einer zurück- und vorversetzten Lage der Abschnitte auf deren Darstellung im Foto zweidimensional foto-optisch aufgenommen. Die Abschnitte wurden derart gelagert, dass alle schwachen bzw. alle starken Abschnittsenden zusammen in einer Aufnahme fotografiert werden

konnten. Die jeweils starken bzw. schwachen Abschnittsenden wurden sowohl bündig als auch unbündig gelagert (bis zu 75 cm zurück- und vorversetzt) und fotografiert.



Abbildung 25: links: bündige Lagerung der Abschnitte; rechts: zurück- und vorversetzte Lagerung der Abschnitte

Als Maßstab wurde das in Kapitel 3.2.1.1 beschriebene Passpunktsystem eingesetzt. Die Entfernung der Abschnitte von der Kamera wurde mit Hilfe eines *Disto*®-Lasers der Firma *Leica* eingemessen.

Für einen Vergleich mit den aus den zweidimensional foto-optischen Aufnahmen ermittelten Stirnflächen wurden die „wahren“ Abschnittsflächen mit Hilfe einer Winkelschablone in 36 Radian der Stirnflächen (alle 10 °) vermessen und aus den Radian die Stirnfläche errechnet. Die Abschnittsvolumina wurden über eine sektionsweise (25 cm-Sektionen) Kreuzklappung der entrindeten Abschnitte und der Abschnittslänge errechnet.

3.6.2 Feldversuche

Vorversuch im Holz-Zwischenlager Rheinhafen und am Werkseingang eines Kurzholzhofes

Im „Rheinhafen“ in Karlsruhe wurden in einem Holzzwischenlager im Dezember 2000 die Rundholzladungen von 29 Lkw-Anhängern digital fotografiert (vgl. Tabelle 1).

Die Probeaufnahmen wurden mit der Bildbearbeitungsroutine „*Photoshop D1-4.0.1 + Scion Image*“ ausgewertet.

Zusätzlich wurden am Werkseingang des Kurzholzhofs der Firma *Dold Holzwerke GmbH* in Hüfingen im April 2001 weitere Probeaufnahmen angefertigt und mit derselben Routine ausgewertet.

Die Auswertung dieser Aufnahmen diente in erster Linie der Weiterentwicklung und Optimierung der Aufnahme- und Auswertungsverfahren für die anschließend durchgeführten Versuche.

Versuche in den Beständen „Vöhrenbach“ und „Hammereisenbach“

Bestand „Vöhrenbach“ (November 2001)

Das Revier „Vöhrenbach“ befindet sich in der Nähe des Ortes Vöhrenbach im südlichen Schwarzwald westlich von Villingen-Schwenningen. Der Bestand liegt auf etwa 750 Meter NN Höhe an einem leicht nach Nordwest geneigten Hang.

In dem Revier wurde im Destrikt 1 die Abteilung 8 a⁶ (südlicher Teil) durchforstet. In dieser Abteilung stockt ein etwa 60-jähriges, an mehreren Orten geschlossenes, im Norden lückiges Fichten-Baumholz. Auf 20 % der Fläche findet sich Kiefer in einzel- bis truppweiser Mischung.

Bei der Durchforstung wurde neben einem Fichtensägerundholz-Sortiment der Länge 6 Meter mit Mindestzopf 14 cm auch Papierholz der Länge 2 Meter aufgearbeitet. Die Durchmesser des Sägerundholzsortiments wurden einzelstammweise gekluppt und die Abschnitte in einem Polter an der Waldstraße so gelagert, dass die starken Abschnittsenden der Waldstraße zugewandt waren. Die starken Stirnflächen von insgesamt 184 Abschnitten wurden mit dem zwei- und dreidimensional foto-optischen Verfahren aufgenommen (vgl. Tabelle 1).

Bestand „Hammereisenbach“ (Dezember 2001)

Das Revier „Hammereisenbach“ liegt nahe der Ortschaft Hammereisenbach im südlichen Schwarzwald süd-westlich von Villingen-Schwenningen.

In dem Revier wurden im Destrikt 0 die Abteilungen 30 und 33 durchforstet. Beide Bestände liegen auf etwa 950 Meter NN auf einem leicht nach Nordwest bzw. nach Nord geneigtem Hochplateau.

In der Abteilung 30 stockt ein im Mittel 55-jähriges, geschlossenes, einschichtiges, flächenweise ungleichaltriges Fichten-Stangenholz mit gruppen- bis horstweiser Beimischung von Kiefer und Einzelbeimischungen von Tanne.

In der Abteilung 33 stockt ein im Mittel 82-jähriges, geschlossenes bis lückiges, einschichtiges, flächenweise ungleichaltriges Fichten-Baumholz mit Tannen- und Buchen-Vorbau auf einer Fläche von jeweils 0,1 ha.

Neben den Sägerundholzabschnitten der Länge 5 Meter mit Mindestzopf 14 cm wurden auch 4 Meter-Abschnitte sowie Papierholz mit der Länge 2 Meter von einem Harvester des Typs CAT® 580 aufgearbeitet. Ebenso wie im Bestand „Vöhrenbach“ wurden die Durchmesser der Abschnitte einzelstammweise gekluppt und die Abschnitte an der Waldstraße in einheitlicher Richtung gepoltert. Insgesamt wurden in fünf Poltern 486 Abschnitte, zumeist an beiden Polterstirnseiten, zweidimensional foto-optisch aufgenommen. Die Polterbreiten betragen 4 Meter und die Polterhöhen 2,50 bis 3 Meter. Die aufgenommenen Variablen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Versuche am Werkseingang des Kurzholzhofs

Am Werkseingang des Kurzholzhofs der Firma *Dold Holzwerke GmbH* in Hüfingen wurden im Rahmen der Hauptuntersuchung zwei Einzeluntersuchungen durchgeführt.

In der ersten Untersuchung (November 2001) wurden als Transportladung insgesamt 215 Abschnitte auf drei Lkws zweidimensional foto-optisch aufgenommen und anschließend im Werk opto-elektronisch (WEV) vermessen (vgl. Tabelle 1). Bei dem Versuchsmaterial handelte es sich um Abschnitte aus dem Bestand „Vöhrenbach“.

In der zweiten Einzeluntersuchung (Dezember 2001) wurden als Transportladungen insgesamt 253 Abschnitte auf vier Lkws zweidimensional foto-optisch aufgenommen. Die Abschnitte entstammten dem Bestand „Hammereisenbach“.

Tabelle 1: In den Feldversuchen aufgenommene Variablen

	Vorversuche		Versuche	
	Zwischenlager 12/2000	Werkseingang 04/2001	Bestand & Werks- eingang 11/2001	Bestand & Werksein- gang 12/2001
Nummerierung der Abschnitte	-	✓	✓	✓
Kluppung	✓	-	✓	✓
Harvester- vermessung	-	-	-	✓
Anzahl Polter	-	-	1	5
Anzahl zweidim. foto-optisch aufgenommener Abschnitte	-	-	184 (Bestand) 215 (Werk)	486 (Bestand) 253 (Werk)
zweidim. foto-optische Aufnahme der Polter	-	-	✓	✓
dreidim. foto-optische Aufnahme der Polter	-	-	✓	✓
Anzahl Lkw-Ladungen	29	3	3	4
zweidim. foto-optische Auf- nahme der Lkw-Ladungen	✓	✓	✓	✓
dreidim. foto-optische Auf- nahme der Lkw-Ladungen	-	-	✓	✓
Maßstab	Kfz- Kennzeichen der Lkws	Referenz- schild	Passpunktsystem Referenzschild	Passpunktsystem Referenzschild
opto-elektronische Vermes- sung (WEV) der Abschnitte	-	✓	✓	✓

3.7 Evaluierung der Ergebnisse der methodischen Voruntersuchungen

Das Ziel der methodischen Untersuchungen, die zu Beginn des Projekts durchgeführt wurden, bestand darin, eine geeignete Hard- und Software zu entwickeln und bereitzustellen, die genaue, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Die Anlage und die Ergebnisse der Voruntersuchungen sind ausführlich in FINK UND BECKER (2002) beschrieben, und werden mit den Ergebnisse weiterer methodischer Vorarbeiten getrennt nach den Bereichenameratechnik, Bildvorverarbeitung und Delinierungsverfahren zusammenfassend im folgenden dargestellt:

Kameratechnik

Es werden die Ergebnisse der Stirnflächenermittlung, die mit unterschiedlich auflösenden Digitalkameras aufgenommen wurden, gegenübergestellt. Im Hinblick auf einen Praxiseinsatz des Verfahrens kann auf diese Weise eine qualitativ hinreichende, jedoch kostengünstige Kameratechnik gewählt werden.

Bildvorverarbeitung

Es wird geprüft, inwieweit das in Kapitel 3.2.1.1 beschriebene Verfahren der Bildvorverarbeitung die Ergebnisse der Stirnflächenermittlung beeinflusst. Dazu werden Stirnflächen, die aus den Originalbildern ermittelt wurden, mit denen aus den zugehörigen verzeichnungsfreien Bildern verglichen.

Bildauswertungsverfahren

Die Präzision und die Genauigkeit der eingesetzten manuellen Bildauswertungsverfahren werden durch Gegenüberstellung der aus den Bildern ermittelten Flächen vergleichend betrachtet. Die Ergebnisse der automatisierten Delinierungsverfahren werden mit den im Bild von Hand delinierten Stirnflächen verglichen.

3.8 Evaluierung der Messergebnisse der Stirnflächen

Es soll untersucht werden, ob Flächenunterschiede zwischen foto-optischer Fläche und realer Fläche auftreten und welche Faktoren diese Unterschiede verursachen. Die Evaluierung der Messergebnisse der Stirnflächen erfolgt in fünf Teilschritten.

Stirnflächenvergleich

Die foto-optisch ermittelten Stirnflächen werden mit den Stirnflächen, die aus den beschriebenen Vergleichsmaßen hergeleitet wurden, verglichen.

Bildfaktoren

Es wird untersucht, ob auftretende Stirnflächenunterschiede durch die eingesetzte Methodik des Bildaufnahme- und Bildauswertungsverfahrens erklärt werden können.

Einflussfaktor Aufnahmeentfernung

Die Aufnahmeentfernung zwischen Kamera und Stirnflächen wird als Einflussfaktor auf die Stirnflächengröße untersucht. Dazu werden auch die Ergebnisse der entfernungsunabhängigen Stirnflächenvermessung (stereo-photogrammetrisches Verfahren) vergleichend betrachtet.

Stirnflächenformklassifikation

Die foto-optisch ermittelten Stirnflächen werden visuell und mathematisch nach ihrer Form klassifiziert. Es wird geprüft, ob sich auftretende Flächenunterschiede zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen der Vergleichsmaße (hier: Werkeingangsvermessung) durch die Form der Stirnflächen erklären lassen.

Formanpassung der Stirnflächen (Stirnflächenoptimierung)

Es wird untersucht, ob für die beschriebenen Formklassen aus den zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen geometrisch konstruierte Stirnflächen berechnet werden können, mit denen das Abschnittsvolumen (hier: Abschnittsvolumen der Werkeingangsvermessung) genauer geschätzt werden kann als mit den foto-optisch ermittelten Stirnflächen.

3.9 Evaluierung der aus den Messungen ermittelten Abschnittsvolumina

Die ermittelten Abschnittsvolumina werden miteinander verglichen, um die Volumenmessgenauigkeit des hier entwickelten foto-optischen Verfahrens einschätzen zu können.

Einzelstammvolumina

Die aus den Stirnflächen der Abschnitte und der Abschnittslänge ermittelten Abschnittsvolumina werden einzelstammweise mit den aus den Vergleichsmaßen hergeleiteten Volumina verglichen.

Ladungs-/Poltervolumen

Die Ergebnisse des summarischen Gesamtvolumens einer Transport- (auf dem Lkw) oder Lagerungseinheit (an der Waldstraße), die mit einem Foto aufgenommen wurde, werden vergleichend betrachtet. Dazu werden die bildweisen Gesamtvolumina des foto-optischen Verfahrens und der Vergleichsmaße gegenübergestellt.

Durchmesser-/Stärkeklassenverteilung

Aus den foto-optisch ermittelten Einzelabschnittsvolumina werden jeweils die mittleren Durchmesser der Abschnitte abgeleitet. Diese mittleren Durchmesser werden mit den Mittendurchmessern, die in der Werkeingangsvermessung ermittelt wurden, verglichen. Die Durchmesser- und die sich daraus ergebende Stärkeklassenverteilung werden zwischen diesen beiden Verfahren miteinander verglichen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Methodische Voruntersuchungen

4.1.1 Kameravergleich

Mit dem vergleichenden Einsatz der Kameratypen *Coolpix 990* (2048x1536 Pixel) und *Coolpix 5700* (2569x1920 Pixel) wurde überprüft, ob die unterschiedlichen, maximal möglichen Bildauflösungen der Kameras bei der eingesetzten Auswertungsroutine (hier: Routine auf Basis von ArcView Gis 3.2) zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Normkörper (DIN A4-Flächengröße: 623,7 cm²) wurden dazu bei der Fotonahme in Aufnahmeentfernungen von 9,20 m bis 10,80 m in 0,1 m-Schritten positioniert. Die Fläche des Normkörpers mit der Aufnahmeentfernung 10 m wurde versuchsaufbaubedingt mit beiden Kameratypen doppelt aufgenommen. Bei der Aufnahme von Normkörpern unter gleichen Aufnahmebedingungen (Kapitel 3.6.1) wurden folgende Ergebnisse ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Deskriptive Statistik und t-Test für Normkörper, die mittels *Coolpix 990* und *5700* aufgenommen wurden

Variable	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	Min	MAX	Summe	t	Sig.
<i>Coolpix 990</i>	18	625,3	619,9	61,1	9,8	535,9	735,0	11256	-2,873	*
<i>Coolpix 5700</i>	18	630,2	629,7	66,2	10,5	528,7	750,3	11344		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Die Flächen der Normkörper, die mit der *Coolpix 5700* aufgenommen wurden, zeigen einen geringfügig höheren Mittelwert als die mit der *Coolpix 990* ermittelte Flächen. Bei einer ähnlich hohen Standardabweichung ergibt sich bei der Aufsummierung aller 18 Flächen zu jeweils einer Gesamtfläche ein Flächenunterschied von 0,8 % zwischen den beiden Kameratypen.

Die prozentualen Flächenabweichungen, die sich bei der Aufnahme mit den beiden genannten Kameratypen ergeben, sind in Abhängigkeit von der Aufnahmeentfernung in Abbildung 26 dargestellt. Bei Aufnahmeentfernungen kleiner als 10 m ergeben sich für die *Coolpix 990* tendenziell kleinere Flächenwerte mit einer maximalen Flächenabweichung von -2,05 % als für die *Coolpix 5700*. Die Flächen beider Versuchsreihen zeigen trotz eines signifikanten Ergebnisses des durchgeführten t-Tests sehr ähnliche Werte.

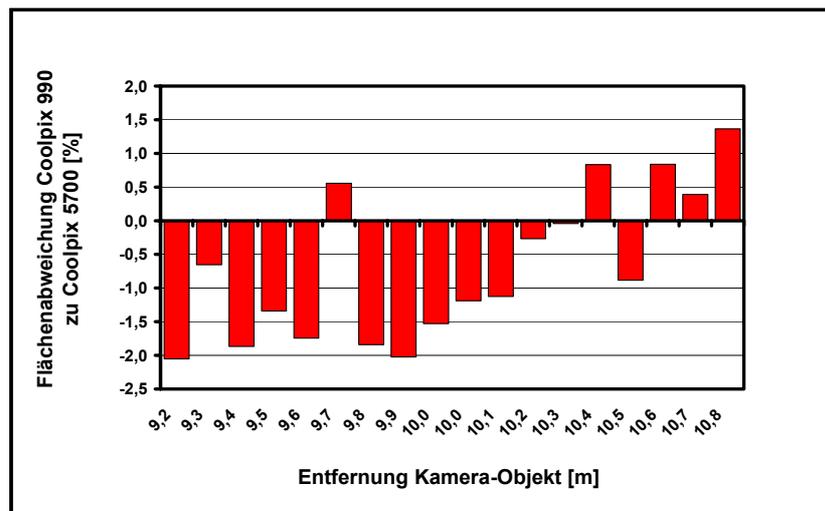


Abbildung 26: Prozentuale Abweichung der mit der Coolpix 990 aufgenommenen Flächen im Verhältnis zu den mit der Coolpix 5700 (100 %) aufgenommenen Flächen [%]

Bei Betrachtung der angefertigten Fotos beider Kamertypen wurde deutlich, dass die höhere Auflösung der Coolpix 5700 keine Vorteile bei der Markierung der Passpunkte des Maßstabssystems und bei der Markierung (Delinierung) der Normkörper im Bild bringt. Weder das Fadenkreuz in den Passpunkten noch die Ecken der Normkörper konnten präziser angefahren werden.

Die Unterschiede, die sich zwischen den Normkörperflächen beider Versuchsreihen zeigen, müssen einerseits auf die Aufnahmebedingungen zurückgeführt werden. Obwohl die Aufnahmebedingungen konstant gehalten wurden, konnten geringfügige Kameraverschwenkungen bei der Bildnahme nicht ausgeschlossen werden. Diese führen zu einer abweichenden Flächendarstellung im Bild.

Andererseits muss berücksichtigt werden, dass die subjektive Einschätzung des Nutzers bei der Markierung von Punkten und Flächen zu geringfügigen, zufälligen Flächenunterschieden führt.

Da die ermittelten Flächen nur geringe Unterschiede aufwiesen, wurde im Hinblick auf eine kostengünstige Umsetzung des foto-optischen Verfahrens in die forstliche Praxis für die weiteren Untersuchungsschritte die *Nikon Coolpix 990* eingesetzt.

4.1.2 Auswirkungen der Bildvorverarbeitung auf die Ergebnisse der Bildauswertung

Um den Einfluss der Bildvorverarbeitung auf die Flächendarstellung für das eingesetzte foto-optische Verfahren quantifizieren zu können, wurden Aufnahmen von Lkw-Holzladungen mit einer Auswertungsroutine („*Adobe Photoshop + Scion Image*“ (Routine 1)) verarbeitet und

diese Ergebnisse mit den Ergebnissen der zugehörigen verzeichnungsfrei gerechneten Bilder verglichen.

Dazu wurden die Stirnflächen in den originalen (verzeichneten) Bildern markiert und mit der Routine ausgewertet. Die Bilder mit den markierten Stirnflächen wurden anschließend verzeichnungsfrei gerechnet und mit der gleichen Routine ausgewertet. Es zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 3).

Tabelle 3: Statistische Kennwerte der Stirnflächen [cm²] verzeichneter (Original-) Bilder und der verzeichnungsfrei gerechneten Bilder im Vergleich und prozentuales Verhältnis der verzeichneten zu den verzeichnungsfreien Stirnflächen [%]

Variable	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sign.
Verzeichnete Stirnflächen [cm ²]	410	382,5	348,9	163,9	42,9	155,8	1176,1	156816	-1,607	n.s.
verzeichnungsfreie Stirnflächen [cm ²]	410	383,0	348,9	164,0	42,8	158,0	1180,3	157050		
$\frac{\text{verz. Stirnfl.}}{\text{verz. - freie Stirnfl.}}$ [%]	410	,15	,16	1,82	-	-4,97	4,88	-		-

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Zwischen den Stirnflächen der verzeichneten und der verzeichnungsfreien Fotos zeigte sich ein Mittelwertsunterschied von 0,5 cm², der nach einem t-Test für gepaarte Stichproben nicht signifikant ist.

Werden die einzelnen Stirnflächenpaare zueinander ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich zwischen den verzeichneten und den verzeichnungsfreien Aufnahmen im Einzelfall eine maximale Abweichung von ca. ± 5 % zwischen den Stirnflächen.

Auf eine Lagerungseinheit bezogen, gleichen sich die Über- und Unterschätzungen der einzelnen Stirnflächen zwischen den verzeichneten (Original-) Bildern und den verzeichnungsfreien Bildern also weitgehend aus.

Für die weiteren Untersuchungen wurden die von den Holzpoltern angefertigten Aufnahmen dennoch im Institut für Angewandte Photogrammetrie der FH Oldenburg verzeichnungsfrei gerechnet, um einen Einfluss der Verzeichnung auf die aus den Bildern ermittelten Flächen auszuschließen.

4.1.3 Präzision und Genauigkeit der Delinierung in den eingesetzten manuellen Bildauswertungsroutinen

Im Rahmen der Bildauswertungsroutinen sind zwei Begriffe zu unterscheiden: (a) Die Präzision und (b) die Genauigkeit.

(a) Nach DIN 55350 wird die Präzision definiert als: „Qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung voneinander unabhängiger Ermittlungsergebnisse bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Ermittlungsverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen.“. Die Präzision der eingesetzten manuellen Bildauswertungsroutinen wurde untersucht, indem eine Normkörperfläche aus einer Aufnahme mehrfach berechnet wurde. Die Normkörperfläche wurde dazu in einer Aufnahme zehnmal abgegriffen und mit beiden Bildauswertungsroutinen je zehnmal errechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Deskriptive Statistik und t-Test der foto-optischen Normkörperflächen, die mit den Auswertungsroutinen in „Adobe Photoshop + Scion Image“ (Routine 1) und ArcView GIS 3.2 (Routine 2) ermittelt wurden.

Variable [cm ²]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	t	Sign.
Normkörperflächen (Routine 1)	10	627,3	626,9	3,03	0,48	623,2	634,8	2,905	*
Normkörperflächen (Routine 2)	10	623,8	624,1	2,30	0,36	617,8	626,2		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Die Standardabweichung der ermittelten Flächen kann als Präzision des eingesetzten Verfahrens interpretiert werden. Sie ist bei der Routine 2 in ArcView GIS 3.2 mit 2,30 cm² etwas kleiner als bei der Routine 1 in „Adobe Photoshop + Scion Image“ (3,03 cm²).

(b) Die Genauigkeit wird nach DIN 55350 definiert als „Qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung von Ermittlungsergebnissen an den Bezugswert, wobei dieser je nach Festlegung oder Vereinbarung der wahre, der richtige oder der Erwartungswert sein kann.“.

Die Genauigkeit der eingesetzten Verfahren wurde überprüft, indem die reale Normkörperfläche (DIN A4-Flächengröße: 623,7 cm²) mit den foto-optisch ermittelten Flächen verglichen wurde.

Mit der Routine 2 (ArcView GIS 3.2) kann die Normkörperfläche im Bild genauer ermittelt werden. Der foto-optisch ermittelte Flächenwert weicht dabei um maximal 0,9 % von der realen Fläche ab (für die Routine 1: maximal 1,7 %).

Die ermittelten Unterschiede zwischen den beiden Auswertungsroutinen sind auf ein exakteres Delinieren des Flächenkörpers und des eingesetzten Maßstabs zurückzuführen. Das Delinieren gelingt in dem Verfahren, das in ArcView GIS 3.2 durchgeführt wird, exakter sowohl hinsichtlich der Präzision als auch der Genauigkeit.

Für die Genauigkeit des Verfahrens muss berücksichtigt werden, dass im Verfahren 2 (ArcView GIS 3.2) die Bildstrecken, die zur Berechnung des Bildmaßstabs eingesetzt werden,

wesentlich größer als in Routine 1 sind. Wird eine Bildstrecke fehlerhaft abgegriffen, wirkt sich dieser Fehler bei der Berechnung der Pixelbreite und -höhe bei Routine 2 günstiger aus, da der Fehler auf eine größere Anzahl von Pixeln verteilt wird. Für die Auswertung der Aufnahmen wurde aus diesem Grund die Routine 2 eingesetzt, wenn der Versuchsaufbau dies zuließ.

Zudem wurde überprüft, ob sich für Abschnittsstinrflächen, die mehrfach fotografiert und anschließend verfahrensgleich ausgewertet werden, eine Flächendifferenz zwischen den Aufnahmen ergibt. Dazu wurden die Stirnflächen von 14 Fichten-Rundholzabschnitten vierfach aufgenommen, wobei für den Vergleich der Stirnflächen je nach Lage der Abschnitte zwischen 2 und 4 Stirnflächen in die Auswertung gingen. Eine Stirnfläche war aufgrund starker Beschattung im Foto nicht klar erkennbar, so dass von den 14 Fichten-Rundholzabschnitten nur 27 (statt 28) Stirnflächen berechnet werden konnten.

In der Auswertung wurden jeweils die gleichen Stirnflächen, die aus den Aufnahmen ermittelt wurden, miteinander verglichen. Dazu wurde der Mittelwert der Stirnflächen, die zu einem Abschnitt gehörten, errechnet und die Standardabweichung ermittelt.

Da erwartet wurde, dass bei großen Stirnflächen der Flächenunterschied, der sich bei der Auswertung der Aufnahmen ergab, absolut am größten ist, wurde die Standardabweichung der ermittelten Flächen prozentual mit der mittleren Fläche ins Verhältnis gesetzt ($\frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} \times 100$). Dies entspricht dem Variationskoeffizienten.

Damit konnten die Flächenunterschiede, die sich zwischen den Stirnflächen aus den Aufnahmen ergaben, unabhängig von der absoluten Flächengröße betrachtet werden (Tabelle 5).

Zusätzlich wurden die Spannweiten der Stirnflächen, die zu einem Abschnitt gehören, berechnet, um die Differenz zwischen den Stirnflächen beschreiben zu können. Die Spannweite wurde ebenfalls prozentual zur zugehörigen mittleren Fläche dargestellt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Variationskoeffizient und das Verhältnis Spannweite zur mittleren Stirnfläche [%].

Variable [%]	n	\bar{x}	Median	x_{\min}	x_{\max}
Variationskoeffizient	27	1,04	0,95	0,03	3,69
$\frac{\text{Spannweite}}{\text{Mittelwert}} \times 100$	27	1,97	1,81	0,04	6,60

Der Variationskoeffizient zeigt ein Minimum von 0,03 % und ein Maximum von 3,69 %. Die größte, auf die mittlere Stirnfläche bezogene Spannweite, die zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen eines Abschnitts berechnet wurde, beträgt 6,6 %.

Für die dargestellten Flächenunterschiede, die hier nachgewiesen werden konnten, müssen zwei mögliche Ursachen diskutiert werden.

Zum einen müssen mögliche variierende Bedingungen bei den Aufnahmen (Kameraverschwenkung) und Fehler bei der Auswertung in Form von Maßstabsfehlern als Ursachen für die Flächenunterschiede in Betracht gezogen werden.

Die Auswirkungen von möglichen stärkeren Kameraverschwenkungen, die sich je nach Position der Stirnfläche im Bild auf deren Abbildung im Bild ergeben, können nach Betrachtung der Bilder ausgeschlossen werden.

Ein fehlerhaftes Abgreifen des Maßstabs hätte zur Folge, dass alle Stirnflächen eines Bildes fehlerhaft – zu groß oder zu klein – dargestellt würden. Beim Vergleich mit der Stirnflächen eines Abschnitts, die aus der weiteren Aufnahme ermittelt wurde, konnten jedoch keine solchen bildweisen Über- und Unterschätzungen der Stirnflächen ausgemacht werden.

Schließlich muss zur Erklärung der ermittelten Stirnflächenunterschiede die unterschiedliche Delinierung der Stirnflächen herangezogen werden. Die Delinierung wurde nach der Vorgabe durchgeführt, den Holzkörper ohne Rinde zu umkreisen. Leicht veränderte Lichtverhältnisse, unterschiedliche Beschattung, abgeplatzte, aber noch am Holzkörper hängende Holzspäne und Verfärbungen erschweren die Einschätzung der Kontur des Holzkörpers und können zu einer unterschiedlichen Delinierung führen.

Unbeschadet dessen ist eine vom Nutzer durchgeführte manuelle Delinierung auch bei „fehlerhaften“ Stirnflächen – bei der errechneten mittleren Streuung von ca. 1 % – hinreichend präzise.

4.1.4 Automatisierte Delinierungsverfahren

Auch die Ergebnisse der eingesetzten, automatisierten Bildverarbeitungsverfahren wurden hinsichtlich der Güte der Delinierung der Stirnflächen beurteilt.

Aktive Konturenmodelle – „snake-Funktion“

Mit Hilfe dieser Anwendung ist es möglich, interaktiv und damit halbautomatisch (nach Anklicken der Stirnflächen mit dem Mauszeiger auf dem Bild) die Stirnflächen der Nadelrundholzabschnitte delinieren zu lassen. Die Markierung bzw. Delinierung gelingt zufriedenstellend für „normale“ Stirnflächen, die wenig verschmutzt, beschattet oder teilweise verdeckt

sind. Nach mehrfachem, manuellem Ansetzen gelingt dies zumeist auch für verschmutzte und beschattete Flächen (Abbildung 27).

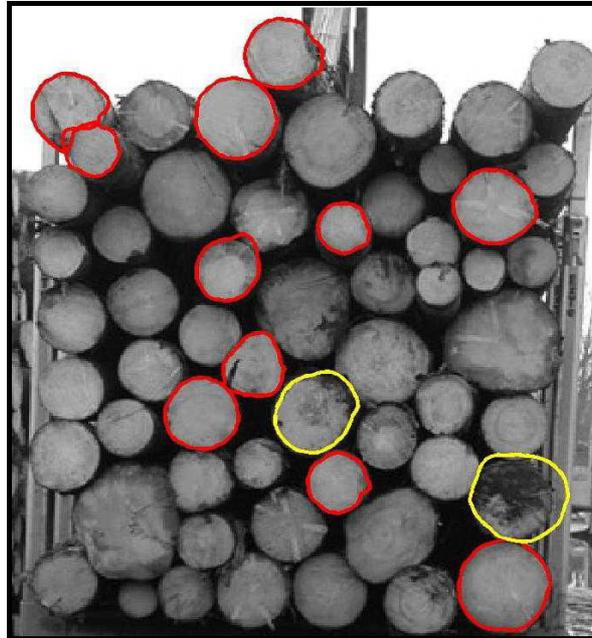


Abbildung 27: Stirnflächen, die mit einer „snake-Funktion“ halbautomatisch (d.h. nach Anklicken der Stirnflächen) deliniert wurden. Gelbe Markierungen zeigen eine unzureichende Delinierung an „problematischen“ Stirnflächen; rote Markierungen zeigen eine zufriedenstellende Delinierung

Einige Stirnflächen, die stark verschmutzt sind, wie die „gelb-delinierte“ im unteren, rechten Bildbereich, erfordern eine weitere Optimierung der „snake-Funktionen“ auf die zuvor genannten, beeinträchtigenden Faktoren.

Eine solche weitere Optimierung der Anwendung erscheint möglich, wenn zusätzliches Vorwissen über die Stirnflächeneigenschaften in die Kriteriendefinitionen der Variablen der „Energiefunktion“ und der Gewichtung der „Energieanteile“ der „snake-Funktion“ einfließt.

Ein Flächenberechnungsmodul, das einen Genauigkeitsvergleich mit den Ergebnissen der manuellen Delinierung erlaubt hätte, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht programmiert werden.

Bildanalyzesystem MVTec® Halcon

Mit Hilfe dieser kommerziellen Bildverarbeitungssoftware wurden die Stirnflächen vollautomatisiert deliniert.

Ergebnisse einer ersten programmierten Auswertungsroutine werden in Abbildung 28 visuell dargestellt.

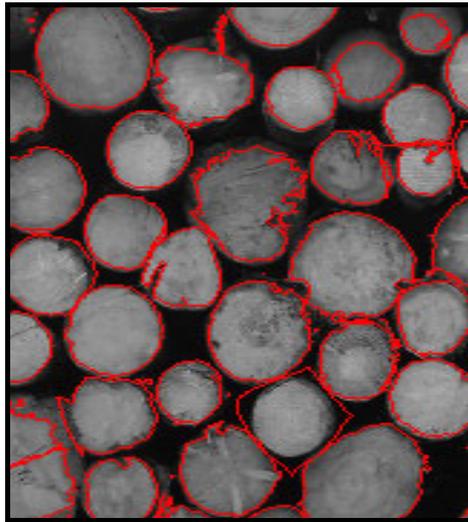


Abbildung 28: Delinierte Stirnflächen mittels Auswertungsroutine in Halcon 6.1

Ein Teil der Stirnflächen wurde im Bild zufrieden stellend nachgezeichnet. Stirnflächen, die aufgrund des Bildkontrastes oder aufgrund von Stirnflächenverschmutzungen keinen scharfen Übergang zum umgebenden Stirnflächenzwischenraum zeigten, wurden teilweise fehlerhaft deliniert.

Für eine weitere Optimierung dieser Programmroutine müssen, wie auch bei den „snake-Funktionen“, weitere „fehlerhafte“ Stirnflächen in die Untersuchung einbezogen werden, um im Sinne einer Lernfunktion die Kriterien der eingesetzten Bildverarbeitungsfilter modifizieren bzw. zusätzliche Filter in die Routine einbinden zu können.

4.2 Messergebnisse der Abschnitts Stirnflächen

Die Ergebnisse der in den verschiedenen Vermessungsverfahren ermittelten Stirnflächen werden vergleichend betrachtet. Dabei steht der Vergleich der foto-optisch ermittelten Stirnflächen mit den zugehörigen Stirnflächen der Vergleichsmaße im Mittelpunkt der Ergebnisdarstellung. Die Ergebnisdarstellung erfolgt auf drei Untersuchungsebenen:

- Ebene 1: Gemeinsames Gesamt-Abschnittskollektiv der beiden Feldversuche „Bestand (Waldstraße) & Werkseingang 11/2001“ und „Bestand (Waldstraße) & Werkseingang 12/2001“
- Ebene 2: Abschnittskollektiv innerhalb eines Bildes
- Ebene 3: Einzelabschnittsweise Betrachtung der Abschnitte

Der Stirnflächenvergleich wird zuerst gemeinsam für die Daten beider Feldversuche (Untersuchungsebene 1) dargestellt. Auf der Untersuchungsebene 2 werden die Abschnitte

betrachtet, die mit einem Bild aufgenommen wurden. Aus diesem Grund wurden in der Ergebnisdarstellung die Stirnflächen, die innerhalb der foto-optischen Verfahren mit einem Bild aufgenommen wurden, zu einer „Gesamtstirnfläche“ aller Abschnitte pro Bild aufsummiert und mit den entsprechenden „Gesamtstirnflächen“ der Kontrollverfahren verglichen. Dieser summarische Vergleich erscheint besonders zielführend, da auch in einem späteren praktischen Einsatz des Verfahrens ein Abschnittskollektiv mit einer Aufnahme möglichst realitätsnah erhoben werden soll.

Um den statistischen Zusammenhang zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen der Vergleichsmaße zu untersuchen, wurde für das Gesamtkollektiv (Untersuchungsebene 1) getrennt nach dem Aufnahmeort Waldstraße und Werkseingang eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass anhand von Korrelationsanalysen nur Aussagen über die Rangordnungen der Variablen getroffen werden können; ein systematischer Bias zwischen den untersuchten Variablen kann dennoch bestehen.

Bei Korrelations- und Regressionsanalysen verzerren Extremwerte die Ergebnisse dieser Analysen deutlich. Deshalb wurden vor der Auswertung der Daten diese auf Erhebungsfehler bzw. Verknüpfungsfehler hin überprüft.

Nach dieser Plausibilitätsprüfung wurden Werte, die bezüglich des prozentualen Verhältnisses zwischen den erhobenen Stirnflächen der Werkeingangsvermessung und den foto-optischen Vermessungen außerhalb eines 99 %-Konfidenzintervalls lagen, eliminiert.

4.2.1 Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)

Für die Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) im Vergleich mit den Stirnflächen aus der Werkeingangsvermessung (WEV) zeigen sich für Untersuchungsebene 1 folgende Ergebnisse (Tabelle 6).

Tabelle 6: Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [cm²]

Variable [cm ²]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Stirnfläche ZFV	1715	348	324	131	37,5	123	843	596710	4,153	*
Stirnfläche WEV	1715	344	330	117	34,0	152	750	590418		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Das Gesamtkollektiv unterscheidet sich zwischen beiden Verfahren um 1,1 %. Das Stirnflächenkollektiv des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) zeigt mit 348 cm² einen leicht höheren Wert für die mittlere Stirnfläche als die Werkeingangsvermessung (WEV).

Ebenso ergibt sich für die foto-optisch ermittelten Stirnflächen eine größere Spannweite (720 cm² gegenüber 598 cm²) zwischen minimalem und maximalem Stirnflächenwert.

Die Stirnflächen, die foto-optisch mit einem Bild erhoben wurden, werden zu einer „Gesamtstirnfläche“ pro Bild aufsummiert. Die zugehörigen Stirnflächen, die aus den Vergleichsmaßen hergeleitet wurden, werden ebenfalls zu einer Gesamtstirnfläche pro Bild addiert.

Werden diese beiden Gesamtstirnflächen zueinander ins Verhältnis gesetzt, so ergeben sich für jedes Bild (Untersuchungsebene 2) folgende prozentualen Abweichungen pro Bild (Tabelle 7 und vgl. Anhang Abbildung 43). Dabei erfolgt sowohl eine getrennte Betrachtung der Bilder, die im Wald (20) und am Werkseingang (12) aufgenommen wurden als auch eine gemeinsame Betrachtung aller 32 angefertigten Aufnahmen.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen der Werkeingangsvermessung (WEV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Stirnflächen WEV}}{\sum \text{Stirnflächen ZFV}} - 1) \times 100$	Werkseingang [12]	2,9	3,8	3,5	-2,9	6,9	3,029	*
	Waldstraße [20]	-2,5	-2,8	5,6	-11,6	8,0		
	Gesamt [32]	-0,5	0,4	5,5	-11,6	8,0		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Für die Bilder, die am Werkseingang angefertigt wurden, liegen die aufsummierten Stirnflächen der WEV im Mittel über den Werten des ZFV; für die Bilder, die an der Waldstraße angefertigt wurden, im Mittel unter den Werten des ZFV.

Die Werte der WEV zeigen im Vergleich zu den Werten des ZFV jedoch für beide Aufnahmeorte sowohl Überschätzungen (Maximalwert) als auch Unterschätzungen (Minimalwert).

4.2.2 Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – Harvestervermessung (HV)

Für die Stirnflächen der ZFV und die Stirnflächen der Harvestervermessung (HV) wurden für 1258 Stirnflächen folgende Werte errechnet (Untersuchungsebene 1) (Tabelle 8).

Tabelle 8: Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [cm²]

Variable [cm ²]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Stirnfläche ZFV	1258	360	337	134	37,2	125	788	452801	-1,578	*
Stirnfläche HV	1258	356	330	134	37,6	152	935	447649		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Der Stirnflächenmittelwert der zweidimensionalen foto-optischen Vermessung liegt geringfügig (4 cm²) über dem Mittelwert der Harvestervermessung. Das Gesamtkollektiv aller Stirnflächen unterscheidet sich zwischen beiden Verfahren um 1,1 %.

Die Spannweite für die foto-optisch ermittelten Stirnflächen (ZFV) ist kleiner als für die Stirnflächen der Harvestervermessung (663 cm² gegenüber 783 cm²).

Werden pro Bild die aufsummierten Stirnflächen beider Verfahren ins Verhältnis gesetzt (Untersuchungsebene 2), zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 9 und vgl. Anhang Abbildung 43).

Tabelle 9: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen der Harvestervermessung (HV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$\left(\frac{\sum \text{Stirnflächen HV}}{\sum \text{Stirnflächen ZFV}} - 1 \right) \times 100$	Werkseingang [7]	3,6	3,1	5,0	-3,9	9,5	2,724	*
	Waldstraße [15]	-2,6	-3,1	4,9	-8,7	8,4		
	Gesamt [22]	-0,6	-1,9	5,6	-8,7	9,5		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Für die Bilder am Werkseingang zeigt sich im Mittel eine um 3,6 % höhere aufsummierte „Gesamtstirnfläche“ für die Harvestervermessung (HV).

Für die Bilder an der Waldstraße liegen im Mittel die Gesamtstirnflächen der HV unter den Werten des ZFV (-2,6 %).

4.2.3 Vergleich zweidimensional foto-optische Vermessung (ZFV) – dreidimensional foto-optische (stereo-photogrammetrische) Vermessung (DFV)

Eine vergleichende Betrachtung der aus den beiden angewendeten foto-optischen Verfahren ermittelten Stirnflächen zeigt folgende Ergebnisse (Untersuchungsebene 1) (Tabelle 10).

Tabelle 10: Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensional und dreidimensional foto-optischen Verfahrens [cm²]

Variable [cm ²]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Stirnfläche ZFV	859	383	361	145	37,9	143	843	329116	8,335	*
Stirnfläche DFV	859	374	348	134	36,0	144	788	320955		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Für das zweidimensionale Verfahren liegt sowohl die mittlere Stirnfläche (383 cm²) als auch die Summe der Stirnflächen (329116 cm²) über den Werten des dreidimensionalen Verfahrens (374 cm² und 320955 cm²). Das Gesamtkollektiv aller Stirnflächen unterscheidet sich somit um 2,5 %.

Für die aufsummierten Stirnflächen je Bild (Untersuchungsebene 2) ergeben sich zwischen beiden foto-optischen Verfahren folgende prozentuale Unterschiede (Tabelle 11 und vgl. Anhang Abbildung 43).

Tabelle 11: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen des dreidimensional foto-optischen Verfahrens (DFV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$\left(\frac{\sum \text{Stirnflächen DFV}}{\sum \text{Stirnflächen ZFV}} - 1 \right) \times 100$	Werkseingang [5]	4,6	3,3	2,1	2,7	7,2	3,146	*
	Waldstraße [8]	-4,9	-5,4	6,4	-12,6	7,5		
	Gesamt [13]	-1,3	-1,0	6,9	-12,6	7,5		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Wie auch für die bisher beschriebenen Stirnflächenvergleiche mit den Vergleichsmaßen liegt die mittlere aufsummierte Stirnfläche des zweidimensional foto-optischen Verfahrens bei der Aufnahme von Lkw-Ladungen leicht unter dem entsprechenden Wert des dreidimensionalen Verfahrens. Diese höheren aufsummierten Stirnflächenwerte lassen sich bei allen fünf Aufnahmen beobachten. Dies könnte mit der unterschiedlichen Maßstabseinbringung zusammenhängen (vgl. Kapitel 4.2.5).

Mittels Korrelationsanalyse wurde überprüft, wie stark der lineare Zusammenhang zwischen den einzelnen Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens und den Stirnflächen der Vergleichsmaße ist.

Dabei wurden folgende Korrelationskoeffizienten getrennt für die zuvor beschriebenen Untersuchungsebenen errechnet.

Tabelle 12: Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für das zweidimensionale foto-optische Verfahren (ZFV), das dreidimensionale foto-optische Verfahren (DFV), die Harvestervermessung (HV) und die Werkeingangsvermessung (WEV)

	ZFV	DFV	HV	WEV
ZFV [n]		0,990 383	0,739 462	0,970 781
DFV [n]	0,979 476		0,748 206	0,969 350
HV [n]	0,784 796	0,708 434		0,857 488
WEV [n]	0,962 934	0,965 432	0,829 767	

Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Waldstraße

Werkseingang

Es ergeben sich für die Zusammenhänge zwischen den foto-optischen Verfahren und der Werkeingangsvermessung sehr hohe Korrelationskoeffizienten (zwischen $r = 0,962$ und $r = 0,990$). Für das Abschnittskollektiv, das als Lkw-Ladung am Werkseingang ermittelt wurde, erreichen die Korrelationskoeffizienten leicht höhere Werte als für das Abschnittskollektiv, das als Polter an der Waldstraße aufgenommen wurde.

Die Korrelationskoeffizienten für die Harvestervermessung (HV) und die Verfahren ZFV, DFV und WEV erreichen Werte von $r = 0,708$ bis $r = 0,829$ und korrelieren somit schwächer als die foto-optischen Verfahren.

Als Grund für diese niedrigeren Korrelationskoeffizienten kommt die Erfassung der Stirnfläche am Harvester mit nur einer mechanischen Durchmesseremessung in Frage.

Zusammenfassend betrachtet liegen die aufsummierten Abschnittsstirnflächen des Gesamtkollektivs bei dem entwickelten foto-optischen Verfahren (ZFV) leicht höher als bei den Vergleichsverfahren (WEV, HV und DFV).

Die beiden foto-optischen Verfahren (ZFV und DFV) unterscheiden sich stärker voneinander (2,5 %) als das zweidimensionale foto-optische (ZFV) von den Vergleichsmaßen Werksvermessung (WEV) und Harvestervermessung (HV) (jeweils 1,1 %).

Bei den in Tabelle 7, Tabelle 9 und Tabelle 11 dargestellten Verhältnissen zwischen den pro Bild aufsummierten Stirnflächen der verschiedenen Aufnahmeverfahren zeigen die beiden foto-optischen Verfahren die größte Streuung (Standardabweichung $s = 6,9$ %; Tabelle 11).

4.2.4 Diskussion der Stirnflächenmessungen

Bei der folgenden Bewertung der Ergebnisse der Stirnflächenmessungen können zum einen Faktoren herangezogen werden, die sich durch die eingesetzte Aufnahme- und Auswertungsmethodik ergeben. Zum anderen können die Form und die Lage der Abschnitte in den Poltern und Lkw-Ladungen Ursachen für die Stirnflächenunterschiede sein.

Beide foto-optischen Verfahren arbeiten im Gegensatz zu den Aufnahmeverfahren Werksvermessung und Harvestervermessung mit einer Delinierung der Stirnflächen. Da die Stirnflächen in beiden foto-optischen Verfahren nach denselben Richtlinien von derselben Person deliniert wurden, können systematische Delinierungsunterschiede zwischen beiden Verfahren ausgeschlossen werden.

Der errechnete Korrelationskoeffizient zeigt für die Stirnflächen der beiden foto-optischen Verfahren die erwarteten höchsten Werte ($r = 0,979$ bzw. $r = 0,990$; Tabelle 12). Korrelationen sagen jedoch nichts über Mittelwerte aus. Trotz des starken statistischen linearen Zusammenhangs können bildweise größere Stirnflächenunterschiede auftreten, wenn die ermittelten Stirnflächen eines Verfahrens aufgrund unterschiedlicher Aufnahmebedingungen durchgehend größere oder kleinere Werte besitzen als die Stirnflächen, die mit dem zweiten foto-optischen Verfahren ermittelt wurden. Der Korrelationskoeffizient würde in diesem Fall trotz einer bildweisen systematischen Über- oder Unterschätzung sehr hohe Korrelationen anzeigen.

In einem ersten Schritt werden mögliche Ursachen für die Stirnflächenunterschiede in den Aufnahmebedingungen und Auswertungskonzepten der Bilder, die innerhalb beider Verfahren angefertigt wurden, gesucht. Diese opto-technischen Aspekte der Bildnahme und -auswertung werden nachfolgend als Bildfaktoren bezeichnet.

4.2.5 Bildfaktoren

Zweidimensionales foto-optisches Verfahren

Die beschriebenen Unterschiede der Stirnflächen, die zwischen dem zwei- und dem dreidimensionalen foto-optischen Verfahren ermittelt wurden, zeigen eine Abhängigkeit von den Aufnahmeorten Waldstraße und Werkseingang. Beim Verhältnisvergleich der aufsummierten Stirnflächen fällt auf, dass die Werte des zweidimensionalen Verfahrens am Werkseingang im Mittel deutlich unter und an der Waldstraße über den Werten des dreidimensionalen Verfahrens liegen. Zur Erklärung dieser Ergebnisunterschiede wird im zweidimensionalen

Verfahren die Position des Maßstabs im Vergleich zur Lage der fotografierten Stirnflächen im Bild untersucht.

Wenn bei der Bildauswertung die eingesetzten Maßstäbe vor der Bildebene (Abschnittsstirnflächen) liegen, verursacht dies bei der Bildauswertung die Ermittlung tendenziell zu kleiner Stirnflächen. Für hinter der Bildebene liegende Maßstäbe werden tendenziell zu große Stirnflächen ermittelt.

Für den Versuchsaufbau am Werkseingang kann festgestellt werden, dass die beiden vorderen Meßlatten des Passpunktsystems, die hier zur Auswertung der zweidimensionalen Aufnahmen eingesetzt wurden, vor der Bildebene lagen. Der Grund für dieses leicht vorgezogene Aufstellen der Meßlatten bestand darin, dass der beladene Lkw zwischen den eingemessenen Meßlatten rangieren musste und dabei ein Anstoßen der Meßlatten zu verhindern war.

Für die Holzpolter an der Waldstraße wurden zumeist die beiden hinteren Meßlatten zur Auswertung des zweidimensionalen Bildes genutzt, da die beiden vorderen Meßlatten am Polterrand positioniert werden mussten, um die Abschnittsstirnflächen nicht zu verdecken. Diese Positionierung der Meßlatten hatte zur Folge, dass diese nicht mit der Digitalkamera erfasst werden konnten. Die hinteren Meßlatten, die leicht hinter der Bildebene lagen, verursachten bei der Bildauswertung eine tendenziell zu kleine Darstellung der Stirnflächen.

Dreidimensionales foto-optisches Verfahren

Die Ergebnisse der Stirnflächen, die mittels dreidimensionalen foto-optischen Verfahren ermittelt wurden, werden ebenfalls vor dem Hintergrund des eingesetzten Aufnahme- und Auswertungsverfahrens diskutiert.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei der stereo-photogrammetrischen Auswertung der Bilder folgende Probleme auftraten:

Bei der absoluten Orientierung der angefertigten Aufnahmen mussten zur Einhaltung der geforderten Fehlertoleranz die Passpunkte einer Maßstabsebene, die jeweils durch das vordere oder hintere Meßlattenpaar aufgespannt wurde, unberücksichtigt bleiben. Dies führte zu einer Instabilität der Modelle bei der Einmessung von Objekten, die in ihrer Entfernung stark von der Modellebene abwichen. Diese Instabilität beeinflusste somit in erster Linie die eingemessenen Entfernungen der Abschnittsstirnflächen.

Die Modellinstabilitäten müssen auf die gewählten Aufnahmekonstellationen (Brennweite, Basisverhältnis, Objektentfernung und Objektiefe; siehe Kapitel 3.2.2.1), unter denen die Aufnahmen angefertigt wurden, zurückgeführt werden.

Neben den dargestellten Bildfaktoren innerhalb der foto-optischen Verfahren, müssen die Ergebnisse der Stirnflächenermittlung vor dem Hintergrund der räumlichen Lage der Abschnitte zueinander und zum eingesetzten Maßstab diskutiert werden.

4.2.6 Vor- und zurückversetzte räumliche Lage der Abschnitte

Eine vor- und zurückversetzte Lage der Abschnitte gegenüber einer Referenzebene (Maßstabsebene) führt beim zweidimensionalen foto-optischen Vermessungsverfahren zu einer fehlerhaften Darstellung der Stirnflächen.

Um den Flächenunterschied zu berechnen, der sich durch eine vor- und zurückversetzte Lage von Objekten zur Maßstabsebene ergibt, wurden die Ergebnisse der Laborversuche hinzugezogen (vgl. 3.6.1).

Für 16 Normkörper, die in den Aufnahmeentfernungen von 9,20 m bis 10,80 m (jede 0,1 m) vor der Kamera positioniert wurden und einem Maßstab in einer Aufnahmeentfernung von 10 m, zeigte sich folgende Abhängigkeit zwischen den Flächen und der Entfernung zum Maßstab (Abbildung 29). Der Normkörper in der Aufnahmeentfernung von 10 m wurde versuchsbedingt doppelt aufgenommen.

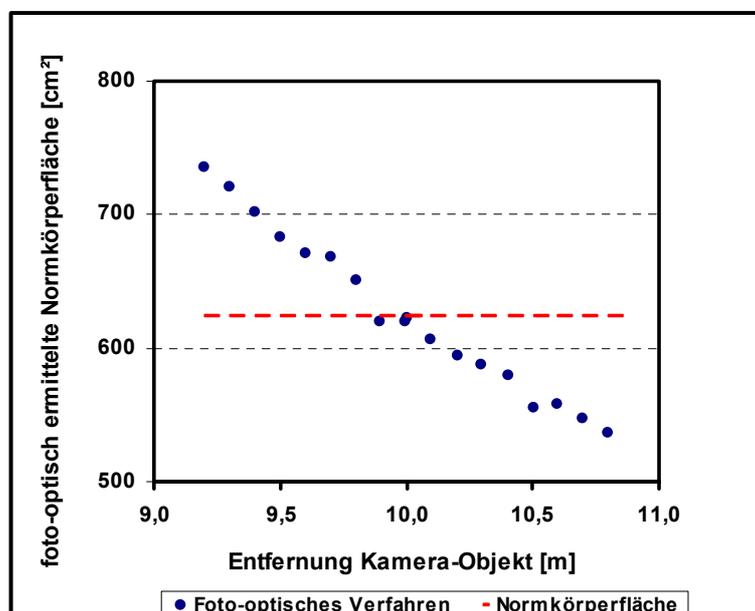


Abbildung 29: Foto-optisch ermittelte Normkörperflächen in Abhängigkeit der Kamera-Objekt-Entfernung

Eine deskriptive Statistik der Normkörperflächen wird in Kapitel 4.1.1 (Tabelle 2) dargestellt. Werden die foto-optisch ermittelten Normkörperflächen mit der Realfläche des Normkörpers

verglichen, zeigen sich maximale Flächenunterschiede bei den Normkörpern, die in der größten Distanz zum Maßstab positioniert sind.

Dies entspricht bei einer Aufnahmeentfernung von 9,20 m einer Flächendifferenz zwischen realer Normkörperfläche und foto-optisch ermittelter Fläche von 17,8 % (111,3 cm²). Für eine Aufnahmeentfernung von 10,80 m zeigt sich eine Flächendifferenz von 14,1 % (87,1 cm²).

In einer linearen Regressionsanalyse der Normkörperflächen mit der Normkörperentfernungsdifferenz zum Maßstab wurde ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,984 ermittelt. Damit sind 98 % der Gesamtstreuung zwischen diesen beiden Variablen erklärbar. Die zugehörige Regressionsgleichung mit der besten linearen Anpassung an die Punktwolke hat die Form:

$$y = 1896,59 - 123,78 x \quad (11).$$

Nach dieser Gleichung ergibt sich für eine Veränderung der Aufnahmeposition von 0,1 m von der Maßstabsebene eine Flächenveränderung der foto-optisch ermittelten Fläche von ± 2 % mit Bezug auf die beschriebenen Aufnahmebedingungen.

Das Ergebnis dieses Versuchs mit Normkörpern wird mit den Versuchsergebnissen einer Stirnflächenaufnahme verglichen, um zu überprüfen, ob diese für Normkörper gefundenen Zusammenhänge auch bei der Aufnahme der Stirnflächen nachgewiesen werden können.

Dazu wurden die Stirnflächen von 14 Nadelrundholzabschnitten innerhalb des Versuchsaufbaus ermittelt, der in Kapitel 4.1.3 beschrieben wurde.

Zum Vergleich der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen bei bündiger und unbündiger Lagerung der Abschnitte wurde ein von der Lage der Abschnitte unabhängiges Vergleichsmaß für die foto-optisch ermittelten Stirnflächen hinzugezogen. Als Vergleichsmaß wurden die Stirnflächen der Abschnitte mit einer Winkelschablone vermessen und über insgesamt 36 Radienmessungen die Abschnittsstirnflächen berechnet.

Die foto-optisch ermittelten Flächen wurden zu den „realen“ Stirnflächen aus den Radienmessungen ins Verhältnis gesetzt und eine prozentuale Abweichung von den „realen“ Stirnflächen errechnet (Tabelle 13).

Tabelle 13: Prozentuale Abweichung der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen mit den „realen“ Stirnflächen, die über eine Radienmessung ermittelt wurden, für bündig und unbündig gelagerte Abschnitte

Variable [%]	Lagerung	n	\bar{x}	Median	x_{\min}	x_{\max}	s
$\left(\frac{\text{Stirnfläche ZFV}}{\text{reale Stirnfläche}} - 1 \right) \times 100$	bündig	21	0,9	0,7	-2,6	3,2	1,4
$\left(\frac{\text{Stirnfläche ZFV}}{\text{reale Stirnfläche}} - 1 \right) \times 100$	unbündig	21	2,7	3,9	-10,3	16,6	6,9

Die Ergebnisse in Tabelle 13 zeigen, dass bei der unbündigen Lagerung der Abschnitte die Stirnflächen, die mit dem foto-optischen Verfahren ermittelt wurden, zwischen -10,3 % bis

+16,6 % von den Referenzmaßen abweichen. Bei den bündig gelagerten Abschnitten ergibt sich eine Abweichung zwischen -2,6 % und +3,2 %. In Abbildung 30 werden diese größeren Abweichungen zwischen den ermittelten Stirnflächen der unbündig gelagerten Abschnitte anhand ihrer Streuung um die eingezeichnete Winkelhalbierende ($x=y$) deutlich.

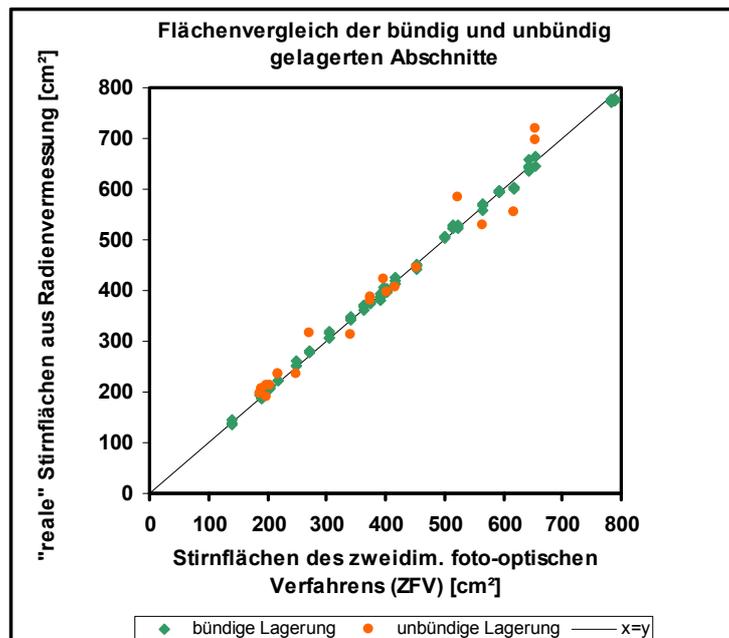


Abbildung 30: Vergleich der im zweidimensionalen foto-optischen Verfahren ermittelten Stirnflächen mit den „realen“ Stirnflächen bei bündiger bzw. unbündiger Lagerung der Abschnitte

Die foto-optisch ermittelten Stirnflächen der unbündig gelagerten Abschnitte weichen stärker von der Winkelhalbierenden ab als die Stirnflächen der bündig gelagerten Abschnitte.

In einer linearen Regressionsanalyse wurde überprüft, wie das Flächenverhältnis zwischen den zweidimensional foto-optisch ermittelten und den „realen“ Stirnflächen mit der Aufnahmeentfernung zusammenhängt. Die zugehörige Regressionsgleichung mit der besten linearen Anpassung an die Punktwolke (Abbildung 31) hat die Form

$$y = 0,046 - 21,344 x \quad (12)$$

Für das Verhältnis der beiden zuvor genannten Variablen und der Aufnahmeentfernung wurde ein Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,938$ errechnet.

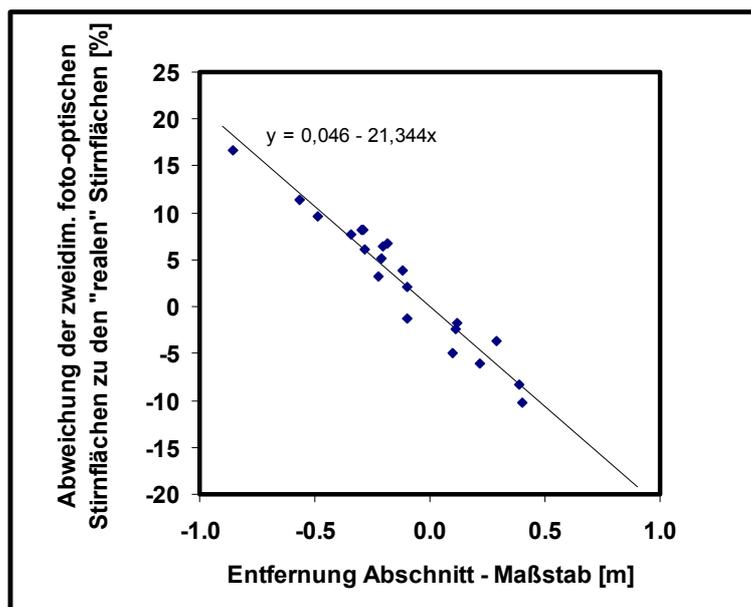


Abbildung 31: Prozentuale Abweichung der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen von den „realen“ Stirnflächen der Radienvermessung in Abhängigkeit der Abschnittsentfernung zum Maßstab in 10 m bzw. der Aufnahmeentfernung der Abschnitte

Nach dieser Regressionsgleichung ergibt sich bei einer Veränderung der Aufnahmeentfernung von 0,1 m eine Flächenveränderung der zweidimensional foto-optischen Flächen von $\pm 2\%$ mit Bezug auf die gegebenen Aufnahmebedingungen.

Sowohl für die Normkörper als auch für die Abschnitts Stirnflächen konnte in beiden Versuchen der Zusammenhang zwischen der Abbildungsgröße eines Objekts mit der Aufnahmeentfernung bzw. der Entfernung vom eingesetzten Maßstab quantifiziert werden ($\pm 2\%$ bei einer Veränderung der Aufnahmeposition von 0,1 m).

Da eine einzelabschnittsweise Entfernungseinmessung zur Korrektur der im Foto abgebildeten Flächen zu aufwendig erschien und bei den Versuchen an der Waldstraße und am Werkseingang nicht durchgeführt werden konnte, muss der Frage nachgegangen werden, ob eine unbündige Lagerung der Abschnitte, wie sie im Holzbereitstellungsprozess an der Waldstraße oder auf dem Lkw vorzufinden ist, die dargestellten Zusammenhänge zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Vergleichsmaßen beeinflusst.

Eine stark vergrößerte bzw. verkleinerte foto-optisch ermittelte Stirnfläche hätte zur Folge, dass die Stirnfläche aufgrund ihrer Flächengröße nicht mehr der zugehörigen Fläche des Vergleichsmaßes zugeordnet werden würde bzw. die Rangordnungen zwischen den Stirnflächen verschoben würden. Diese Verschiebung der Rangordnungen würde ein Absinken des Korrelationskoeffizienten r zwischen den beiden Stirnflächenmaßen verursachen. Eine spätere regressionsanalytische Ermittlung des Abschnittsvolumens wäre eingeschränkt.

Die Rangpositionen zwischen den Stirnflächen bleiben dann gleich, wenn die Über- und Unterschätzungen der Abschnitts Stirnfläche aufgrund des unterschiedlichen Abstands der Abschnitte zum Maßstab kleiner sind als die Differenzen zwischen den Flächen zweier Rangnachbarn.

Aus diesem Grund wurde für ein Holzpolter überprüft, ob sich der Korrelationskoeffizient r nach Pearson zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen der WEV beim „rechnerischen“ Vor- und Zurückverschieben der Abschnitte im Polter verändert. Die Distanz, um die die Abschnitte vor- und zurückversetzt wurden, wurde über den Abstand zwischen dem am weitesten zur Kamera vorgeschobenen und dem am weitesten zurückversetzten Abschnitt ermittelt. Zu den Abschnitten wird eine Bezugsebene konstruiert und mit Hilfe der Entfernungen der Abschnitte zu dieser Bezugsebene eine mittlere Entfernung zu dieser Bezugsebene errechnet. Anhand dieser mittleren Entfernung wird unter Zuhilfenahme von Zufallszahlen, die mit einer Normal-Funktion erzeugt wurden, allen Abschnitten eine neue Entfernung zur Bezugsebene zugewiesen. Anhand der für jeden Abschnitt neu errechneten Entfernung wurde über die zuvor dargestellten Zusammenhänge zwischen Abbildungsgröße eines Objektes und Aufnahmeentfernung eine „neue“ Abschnitts Stirnfläche mathematisch hergeleitet.

Der Korrelationskoeffizient zwischen diesen „neuen“ Abschnitts Stirnflächen und den Vergleichs Stirnflächen der WEV wurde ermittelt und mit dem entsprechenden Koeffizienten für die ursprüngliche Lagerung der Abschnitte verglichen.

Es wurde nach zufälligen Vor- und Zurückverschieben der Abschnitte ($n = 76$) ein Korrelationskoeffizient $r = 0,958$ errechnet, der nur geringfügig unter dem Korrelationskoeffizienten ($r = 0,965$) liegt, der für die ursprüngliche Lagerung der Abschnitte im Polter ermittelt wurde. Trotz einer zu groß bzw. zu klein dargestellten Stirnfläche im Bild verändert sich die Rangordnung der Abschnitte in den ermittelten Stirnflächenvariablen also nur geringfügig. D.h., dass in der Regel eine Stirnfläche, die foto-optisch aufgrund ihrer vorgelagerten Polterposition zu groß dargestellt wird, nicht die Flächengröße der nächst größeren foto-optisch ermittelten Stirnfläche erreicht. Es ergibt sich demnach keine Verschiebung der Rangordnungen innerhalb der Stirnflächenvariablen.

Da sich die beiden Korrelationskoeffizienten nur geringfügig unterscheiden, kann für dieses Polter gefolgert werden, dass die vor- und zurückversetzte Lage der Abschnitte, wie sie in der Praxis vorgefunden werden, keine Auswirkungen auf die Zusammenhänge zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den lageunabhängigen Stirnflächenvergleichsmaßen besitzen.

Anhand der Korrelationskoeffizienten zwischen den Stirnflächen des zwei- und dreidimensionalen foto-optischen Verfahrens ($r = 0,979$ bzw. $r = 0,990$; Tabelle 12) konnte in dieser Untersuchung ebenfalls gezeigt werden, dass in diesen Versuchen die bei der Polterung vorgefundene unbündige Lagerung der Abschnitte nur eine untergeordnete Rolle für die Ermittlung der Stirnfläche spielte.

Als Ergebnis zeigte sich, dass zwar eine vor- und zurückversetzte Position der Abschnitte, wie sie bei den aufgenommenen Poltern vorgefunden wurde, bei der Betrachtung der absoluten Flächenwerte beachtet werden muss, dass die Zusammenhänge zwischen foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen, die aus den Vergleichsmaßen hergeleitet wurden, davon nur kaum beeinflusst werden.

4.2.7 Stirnflächenform

Die Form der Abschnitts Stirnflächen wird klassifiziert, um zu prüfen, ob die Stirnflächenform als Ursache für die aufgetretenen Stirnflächenunterschiede zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen des Vergleichsmaßes (WEV) herangezogen werden kann.

Weiterhin dient die Stirnflächenklassifikation als Basis für die anschließend durchzuführende Stirnflächenoptimierung. Die Stirnflächenoptimierung zielt darauf ab, unregelmäßig geformte Stirnflächen geometrisch so zu modifizieren, dass mit ihrer Hilfe die Volumina der Abschnitte genauer vorhergesagt werden können.

Die zunächst vorgenommene gutachtliche visuelle Klassifikation nach den im Kapitel 3.3.1 beschriebenen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ brachte folgende Ergebnisse: Von den 1871 klassifizierten Stirnflächen besaßen 749 Abschnitte runde Stirnflächen, 978 Abschnitte unrunde Stirnflächen und 144 Abschnitte Stirnflächen mit Wurzelanlauf.

Zur Formalisierung der visuellen Klassifikation erfolgte eine mathematische Klassifikation.

Dazu wurden in einem ersten Schritt die Amplitudenspektren von Stirnflächenpolygonzügen getrennt für die visuellen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnfläche mit Wurzelanlauf“ auf einen charakteristischen Verlauf hin untersucht, um mögliche Zusammenhänge zwischen Spektren und visueller Formklasse aufzudecken. Die Amplitudenspektren wurden dazu in Periodogrammen aufgetragen und visuell miteinander verglichen.

Es zeigte sich visuell kein Zusammenhang zwischen den Stirnflächenformen der verschiedenen Formklassen und den Amplitudenspektren der Stirnflächenpolygonzüge.

In einem zweiten Schritt wurden für die mathematische Klassifikation die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Variablen errechnet:

- (a) Anzahl an Fourierdeskriptoren zur Erklärung eines festgesetzten Schwingungsanteils des Amplitudenspektrums der Stirnflächenpolygonzüge,
- (b) Vergleich der Fehlervarianzen der Koordinaten des ursprünglichen Polygonzugs und der Koordinaten des Polygonzugs, der sich aus dem Fourierkoeffizienten (FK) c_{-1} ergibt,
- (c) direkter Koordinatenvergleich zwischen dem ursprünglichen Polygonzug und dem Polygonzug, der sich aus dem Fourierkoeffizienten (FK) c_{-1} ergibt,
- (d) Quotienten aus Umfang und Fläche des Stammquerschnitts; Quotient aus minimalen und maximalen Radien der Stirnflächen.

zu (a): Es wurde geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fourierdeskriptoren, die notwendig waren, um einen festgesetzten Schwingungsanteil (hier: 70 %) des Amplitudenspektrums zu erklären, und den visuell gebildeten Formklassen bestand (vgl. Anhang Abbildung 44).

Es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fourierdeskriptoren und den visuell gebildeten Formklassen nachgewiesen werden.

Die Form der Stirnflächen wird im Wesentlichen durch den FK c_{-1} beschrieben, da die Stirnflächen annähernd eine Kreisform einnehmen. Da der FK c_{-1} die Grundstruktur (Hauptachse) einer kreisähnlichen Stirnfläche bildet und eine „best-approximation“ an die Stirnflächenkontur darstellt, wurde dieser für die Berechnung eines optimierten Stirnflächenpolygonzugs herangezogen. Auf Grundlage dieses optimierten Polygonzugs wurden die Variablen (b) und (c) berechnet.

zu (b): Als zweite Variable zur mathematischen Klassifikation der Stirnfläche wurde die Fehlervarianz (s^2_{res}) zwischen den Koordinaten des zuvor beschriebenen optimierten Polygonzugs aus dem FK c_{-1} und den Koordinaten des ursprünglichen Polygonzugs für alle Stirnflächen berechnet.

Für jede Stirnfläche wurde eine Fehlervarianz berechnet. Es wurde mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse (vgl. Anhang Tabelle 32) geprüft, ob sich die Formklassen in den Fehlervarianzen unterscheiden. Die durchgeführte einfaktorielle Varianzanalyse machte eine vorherige Logarithmierung der Fehlervarianzen ($\log s^2_{res}$) notwendig, um einen normalverteilten Datensatz zu gewinnen. Die Normalverteilung der Daten ist Voraussetzung für eine einfaktorielle Varianzanalyse. Ein Vergleich der Fehlervarianzen ($\log s^2_{res}$) der entsprechenden Koordinaten zeigt folgendes Ergebnis: Anhand der 1871 Stirnflächen wurde für die drei

visuellen Formklassen jeweils eine mittlere Fehlervarianz errechnet, die sich zwischen den drei Formklassen signifikant voneinander unterscheiden.

Da ein Teil der Abschnitte sowohl im Polter an der Waldstraße als auch auf dem Lkw als Ladung am Werkseingang aufgenommen wurden und somit doppelt klassifiziert wurden, werden die Ergebnisse getrennt nach Waldstraße und Werkseingang aufgeführt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Mittelwerte der logarithmierten Fehlervarianzen ($\log s^2_{res}$) für die visuellen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ für die Aufnahmeorte Waldstraße und Werkseingang

	$\log s^2_{res}$ \bar{x}		
	Rund	Unrund	Stirnfläche mit WA
Waldstraße	-1,11	-0,81	-0,36
Werkseingang	-1,02	-0,78	-0,35
Gesamt	-1,07	-0,79	-0,35

Die Ergebnisse zeigen, dass eine tendenzielle Einschätzung einer Stirnflächenform in die beschriebenen, visuellen Formklassen aufgrund der beschriebenen Polygonzugvariable möglich ist. Eine eindeutige Zuordnung der Stirnflächenform zu den dargestellten Formklassen kann jedoch aufgrund der Streuung der Werte von $\log s^2_{res}$ nicht durchgeführt werden. Der Anteil erklärter Streuung an der Gesamtstreuung beträgt 29 % (Anhang: Tabelle 32).

zu (c): Für die Stirnflächenvariable, die aus dem direktem Koordinatenvergleich zwischen dem ursprünglichen Polygonzug und dem optimiertem Polygonzug errechnet wurde, konnte weder ein Zusammenhang zu den Ergebnissen der visuellen Klassifizierung noch zu den hergeleiteten Klassifizierungsvariablen nachgewiesen werden.

zu (d): Auch für die Quotienten, die aus dem Umfang und der Fläche und aus den minimalen und maximalen Radien der Stirnflächen der fotografierten Abschnitte errechnet wurden, konnten keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den visuellen Klassen nachgewiesen werden.

Bei der bisher beschriebenen mathematischen Klassifikation wurde jeweils die ermittelte Polygonzugvariable im Zusammenhang mit den Ergebnissen der visuellen Klassifikation betrachtet. Dabei wurden Mittelwerte der Polygonzugvariablen getrennt nach den visuellen Formklassen miteinander verglichen, um zu prüfen, ob anhand einer Polygonzugvariable die visuelle Klassifikation der Stirnflächen formalisiert werden kann.

Im Hinblick auf eine automatisierte Klassifikation wurde weiterhin geprüft, ob unabhängig von der visuellen Klassifikation anhand der Polygonzugvariablen Formklassen ausgeschieden werden können. Mittels einer Clusterzentrenanalyse sollten als Formklassen Gruppen gebildet werden, deren Elemente sich innerhalb der Gruppe möglichst ähnlich sind, während sich die Elemente zwischen den verschiedenen Gruppen (Clustern) möglichst deutlich unterscheiden.

In dieser Clusterzentrenanalyse, bei der drei Formklassen möglich sein sollten, wurden folgende Werte errechnet (Tabelle 15).

Tabelle 15: Clusterzentren der logarithmierten Fehlervarianzen der Stirnflächen für die Aufnahmeorte Waldstraße und Werkseingang

	log s ² res		
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Waldstraße	-1,19	-0,77	-0,25
Werkseingang	-1,26	-0,85	-0,30
Gesamt	-1,23	-0,81	-0,29

Die Werte der Clusterzentren zeigen im Vergleich mit den Mittelwerten (Tabelle 14), die für die mathematische Klassifizierungsvariable in den drei visuellen Formklassen errechnet wurden, sehr ähnliche Werte. In einer einfaktoriellen Varianzanalyse wurde berechnet, dass 82 % der Gesamtstreuung der Fehlervarianz erklärt werden können (Anhang: Tabelle 34).

Werden die drei Cluster anhand der Clusterzentren den Formklassen zugeordnet, so ergibt sich, dass nach mathematischer Klassifikation (1879 Stirnflächen) die Formklasse „rund“ aus 711 Stirnflächen (visuell: 749), die Formklasse „unrund“ aus 814 Stirnflächen (visuell: 978) und die Formklasse „Stirnfläche mit Wurzelanlauf“ aus 354 Stirnflächen (visuell: 144) besteht. Diese Klassenverschiebung bedeutet, dass visuell als unrund eingeordnete Stirnflächen in der Clusteranalyse in größerem Umfang als Stirnflächen mit Wurzelanläufen klassifiziert wurden.

Diese clusteranalytisch abgeleitete mathematische Klassifikation zeigt aufgrund des deutlich höheren Anteils erklärter Streuung an der Gesamtstreuung (82 % gegenüber 29 %) eine homogenere Klassifizierung der Stirnflächen als die visuelle Klassifizierung. Es muss allerdings auch darauf hingewiesen werden, dass nach der clusteranalytischen Klassifikation 35 Stirnflächen, die tatsächlich Zopfenden waren, anhand der Werte der Polygonzugvariablen in die Klasse „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ zugeordnet wurden.

Aufgrund der unterschiedlichen Stirnflächenerhebungsverfahren in der Werkeingangsmessung (doppelte Durchmessermaßnahme) und den beiden foto-optischen Verfahren (direkte

Flächenermittlung) war zu erwarten, dass sich Flächenunterschiede in Abhängigkeit der Stirnflächenform ergeben würden.

Dabei wurde angenommen, dass die Stirnflächendifferenz zwischen beiden Verfahren bei Stirnflächen mit welligem Konturverlauf größer ist als bei Stirnflächen mit kreisähnlicher Gestalt, da eine kreisähnliche Form mit Hilfe einer doppelten Durchmesserannahme besser beschrieben werden kann als eine Stirnfläche mit unregelmäßigem Verlauf.

Diese Annahme wird durch folgendes Ergebnis bestätigt: Werden die Korrelationen zwischen den Stirnflächen der ZFV und der WEV getrennt für die visuellen (bzw. mathematischen) Formklassen errechnet, so zeigt sich für die Stirnflächen der Formklasse „rund“ mit $r = 0,967$ ($r = 0,966$) der größte, für die „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ mit $r = 0,856$ ($r = 0,924$) der kleinste Korrelationskoeffizient (vgl. Anhang: Tabelle 35).

Die durchgeführte Stirnflächenklassifikation ist Grundlage für die folgende Stirnflächenoptimierung. Die Stirnflächenoptimierung wird sowohl nach der visuellen Klassifikation als auch nach der beschriebenen mathematischen Klassifikation durchgeführt.

4.2.8 Stirnflächenoptimierung

Der in Kapitel 3.4 beschriebene stammaxiale Querschnittsverlauf der Abschnitte (d.h. die Abholzigkeit) und die unterschiedlich hohen Zusammenhangsmaße, die sich für die drei Formklassen zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Vergleichsstirnflächen der Werkeingangsvermessung ergeben, erfordern für die Schätzung der Abschnittsvolumina je nach eingestufte Stirnflächenform eine „modifizierte“ Stirnfläche. Diese wird in dieser Arbeit als „optimierte“ Stirnfläche bezeichnet.

Getrennt für die 3 Formklassen werden zur Schätzung der Abschnittsvolumina als „optimierte“ Stirnflächen diejenigen Stirnflächen gesucht, die aufgrund ihrer Geometrie den stammaxialen Verlauf der Querschnittsfläche und damit das Abschnittsvolumen am besten vorhersagen.

Zur Ermittlung der „optimierten“ Stirnfläche wurden sowohl Stirnflächen aus den minimalen, mittleren und maximalen Radien der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen hergeleitet, als auch aus vier Ellipsenbögen konstruierte Stirnflächen berechnet. Diese geometrisch ermittelten Stirnflächen werden im weiteren „Stirnflächentypen“ genannt.

Um die Stirnflächen zu identifizieren, die das Abschnittsvolumen genauer schätzen als die ursprünglichen foto-optisch ermittelten Stirnflächen, wurden für alle dargestellten „Stirnflächentypen“ Korrelationskoeffizienten zum Abschnittsvolumen der Werkeingangsvermessung ermittelt. Es zeigt sich, dass für die Stirnflächen am Zopf für beide Arten der Klassifikation und alle drei Formklassen die ursprünglich zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflä-

chen (ZFV) den jeweils höchsten Korrelationskoeffizienten zum WEV-Volumen aufweisen. Eine weitere Optimierung der Stirnflächen am Zopf anhand geometrisch konstruierter Stirnflächen (Stirnflächentypen) ist nicht möglich.

Für die Fußstirnflächen ergeben sich für die zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen und für die Stirnflächen, die aus den minimalen Radien hergeleitet wurden, die straffsten linearen Zusammenhänge mit den Abschnittsvolumina der WEV. In Tabelle 16 ist jeweils der „Stirnflächentyp“ gekennzeichnet, für den der jeweils straffste lineare Zusammenhang mit dem Abschnittsvolumen der Werkeingangsvermessung ermittelt wurde. Die Korrelationskoeffizienten für die jeweils straffsten Zusammenhänge zwischen den beschriebenen Variablen sind im Anhang in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 16: *Stirnflächentypen (Abschnittsfuß), die den höchsten Korrelationskoeffizienten zum Werkeingangsvolumen (WEV) aufweisen – getrennt nach Art der Klassifikation, Formklassen und Abschnittslängen*

Klassifikation	Stirnflächentyp	WEV-Volumen					
		Formklasse					
		Rund		Unrund		Wurzelauf	
		5 m	6 m	5 m	6 m	5 m	6 m
visuell	ZFV [n]	x	x	-	-	-	-
	ZFV min. Rad. [n]	-	-	x	x	x	x
mathem.	ZFV [n]	x	x	x	-	-	x
	ZFV min. Rad. [n]	-	-	-	x	x	-

Für die Stirnflächen am Fuß der Abschnitte wurde für die Formklasse „rund“ der höchste Korrelationskoeffizient zwischen den ursprünglichen foto-optisch ermittelten Stirnflächen des ZFV und den WEV-Volumina errechnet.

Nach der visuellen Klassifikation ergeben sich für die Formklassen „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelauf“ für die Stirnflächen, die aus dem minimalen Radius der foto-optisch ermittelten Stirnflächen berechnet wurden, die höchsten Korrelationskoeffizienten zu den WEV-Abschnittsvolumina.

Im Vergleich zu den entsprechenden Koeffizienten für die foto-optisch ermittelten Stirnflächen zeigen sich für diese aus dem minimalen Radius konstruierten Stirnflächen höhere Koeffizienten (für unrunde Stirnflächen ca. 0,01 höher; für Stirnflächen mit Wurzelauf zwischen 0,08 und 0,13 höher; vgl. Anhang Tabelle 36 und Tabelle 38).

Nach der mathematischen Klassifikation ergeben sich für zwei Stirnflächenkollektive des Stirnflächentyps „Stirnflächen aus den minimalen Radien“ am Fuß der Abschnitte die jeweils höchsten Korrelationskoeffizienten zu den WEV-Volumina:

- für das Stirnflächenkollektiv der Formklasse „unrund“ mit der Abschnittslänge sechs Meter und
- für die „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ der Abschnittslänge fünf Meter

Die Korrelationskoeffizienten liegen um 0,01 bzw. 0,04 höher als die entsprechenden Koeffizienten zwischen den Stirnflächen des Stirnflächentyps „ZFV“ und WEV-Volumina (vgl. Anhang Tabelle 37 und Tabelle 38).

Es zeigt sich bei diesen beschriebenen Stirnflächen mit Wurzelanlauf – allerdings nur bei Stirnflächen von Abschnitten der Länge fünf Meter – , dass anhand einer „Innenradiusfläche“, die mit den minimalen Radien in die foto-optische Flächen geometrisch „hineinkonstruiert“ wurde, die WEV-Volumina genauer vorhergesagt werden können.

Mit Hilfe dieser geometrisch konstruierten Fläche wird die bisweilen wellige Kontur einer Stirnfläche mit Wurzelanlauf auf eine „kreisförmige“ Fläche reduziert, die einen höheren Zusammenhang zum Abschnittsvolumen aufweist. Eine Stirnflächenoptimierung ist für diese Formklasse bei den fünf Meter langen Abschnitten somit möglich.

Für Stirnflächen, die in die Formklassen „rund“ bzw. „unrund“ (5 m) sortiert wurden, ergeben die geometrisch konstruierten Stirnflächen keine verbesserte Volumenschätzung.

Als Ergebnis dieser Analysen wurden im Hinblick auf eine spätere Automatisierung des Verfahrens für die Berechnung der Variablen „optimierte Stirnfläche“ die Ergebnisse der mathematischen Stirnflächenklassifikation (Tabelle 16 und Tabelle 38) herangezogen.

Die Variable „optimierte Stirnfläche“ berechnet sich damit aufgrund der dargestellten Ergebnisse in Abhängigkeit von der Abschnittslänge, der Stirnseite und der Formklasse der Abschnitte wie folgt:

Für die Stirnflächenkollektive, die einen höheren Korrelationskoeffizienten zwischen dem WEV-Volumen und der foto-optisch ermittelten Stirnfläche als zwischen dem WEV-Volumen (ZFV) und der Stirnfläche des minimalen Radius aufweisen (Anhang Tabelle 38), werden die Werte der tatsächlich ermittelten zweidimensional foto-optischen Stirnfläche in die neue Variable („optimierte Stirnfläche“) unverändert übernommen. Für die Stirnflächengruppen („Stirnseite Fuß – 6 m – unrund“ und „Stirnseite Fuß – 5 m – Wurzelanlauf“) wird die aus der Stirnfläche abgeleitete Fläche des kleinsten Radius in die neue Variable „optimierte Stirnfläche“ übertragen.

4.3 Ergebnisse der Abschnittsvolumina

In einem ersten Schritt werden den über die foto-optisch ermittelten Stirnflächen hergeleiteten Abschnittsvolumina die jeweiligen realen Volumina gegenübergestellt, die in der Werkeingangsvermessung (WEV) und bei der Harvestervermessung (HV) über die sektionsweise erhobenen Durchmesser und die gemessenen Abschnittslängen berechnet wurden.

Da für die forstliche Praxis die „Verkaufsvolumina“ der Abschnitte eher noch relevanter als die aus den tatsächlichen Dimensionsmaßen hergeleiteten Volumina sind, wird weiterhin geprüft, wie genau mit dem beschriebenen foto-optischen Vermessungsverfahren das verkaufsrelevante, d.h. den Vermessungsvorschriften der HKS entsprechende Abschnittsvolumen ermittelt werden kann. Deshalb werden in einem zweiten Schritt die jeweiligen Abschnittsvolumina miteinander verglichen, die für die monetäre Bewertung der Abschnitte aus den tatsächlich gemessenen Dimensionsmaßen hergeleitet werden.

Die Berechnung der Referenzmaße dieser HKS-Abschnittsvolumina erfolgt anhand der Bestelllänge der Abschnitte, die sich von der gemessenen Abschnittslänge durch das Übermaß unterscheidet. Die in der WEV gemessenen Mittendurchmesser werden für diese Abschnittsvolumenberechnung nach den Vorschriften zur HKS abgerundet, gemittelt und erneut abgerundet.

Da im praxisanwendbaren zweidimensional foto-optischen Verfahren nur die Abschnittsstirnflächen, nicht aber die Abschnittslängen fotografiert werden können, wurden die Abschnittsvolumina im Rahmen einer Regressionsanalyse indirekt ermittelt.

Dabei wurden die Abschnittsvolumina der WEV als Referenzvolumina eingesetzt. In die Regressionsanalyse gingen als abhängige Variable jeweils die gemessenen Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung ein. Als unabhängige Variable wurden die foto-optisch ermittelten Stirnflächen gewählt.

Aus den Variablen wurde eine Regressionsgerade berechnet. In die Gleichung der Regressionsgeraden wurden wiederum die foto-optisch ermittelten Stirnflächen eingesetzt, um die „foto-optischen Abschnittsvolumina“ zu errechnen.

Eine Korrelationsrechnung zwischen zwei Variablen kann nur dann gerechnet werden, wenn es für jeden Abszissenwert genau einen Ordinatenwert gibt. Da zu einem WEV-Abschnittsvolumen jeweils eine Fuß- und Zopfstirnseite gehören und somit auf jeden Ordinatenwert zwei Abszissenwerte kommen, ist das Zusammenführen beider foto-optischen Stirnflächen mit dem zugehörigen Abschnittsvolumen aus der Werkeingangsvermessung in einer einzigen Regressionsanalyse nicht zielführend.

Deshalb wurden jeweils getrennt für die Stirnseiten (Fuß und Zopf) Regressionsanalysen zwischen den Abschnittsvolumina und den Abschnittsstirnflächen durchgeführt und die entsprechenden Regressionsgeraden berechnet (vgl. Anhang Abbildung 47). Bei einer weiteren Differenzierung des Abschnittskollektivs nach Aufnahmeort, Abschnittslänge (Abschnittssortiment der Länge fünf und sechs Meter) und Formklasse der Abschnittsstirnflächen (rund, unrund, Wurzelanlauf) ergaben sich für diese differenziert hergeleiteten Regressionen jeweils höhere Bestimmtheitsmaße (R^2) als bei einer alle Variablen umfassenden Regressionsanalyse.

Bei der Errechnung der Abschnittsvolumina über die optimierten Stirnflächen (Kapitel 4.2.8) wurde als abhängige Variable die „optimierte Stirnfläche“ anstatt der tatsächlichen ermittelten Stirnfläche der Abschnitte eingesetzt.

Bei der Betrachtung der mit Hilfe dieser Regressionsanalysen ermittelten Volumenergebnisse ist zu berücksichtigen, dass jeweils die vorhergesagten Werte (foto-optisch ermittelten Abschnittsvolumina) mit den „realen“ Werten (WEV-Abschnittsvolumina) verglichen werden. Da jedoch die foto-optisch ermittelten Volumina anhand der Regressionsgeraden über die WEV-Volumina berechnet wurden, sind ähnliche Mittelwerte der beiden beschriebenen Volumina auf Gesamtkollektivebene aufgrund der errechneten hohen R^2 für den Zusammenhang zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den WEV-Volumina ohnehin nahe liegend. Um die Genauigkeit des entwickelten Verfahrens beurteilen zu können, müssen daher vor allem die Streuungsmaße, die die beiden Volumina aufzeigen, betrachtet werden. Beim Ergebnisvergleich der beiden Volumina steht deshalb die Fehlerbetrachtung bzw. die Variabilität der ermittelten Volumina im Vordergrund.

Für die folgende Ergebnisbetrachtung der Abschnittsvolumina muss auch darauf hingewiesen werden, dass in den Tabellen alle mit den differenzierten Regressionsanalysen, d.h. für alle Stirnseiten, Abschnittslängen und Formklassen, ermittelten foto-optischen Einzelabschnittsvolumina zusammengefasst sind. Für einen Abschnitt ergeben sich daher für die beiden foto-optisch ermittelten Stirnflächen (Fuß und Zopf) auch zwei foto-optische Abschnittsvolumina – denen jeweils nur ein Referenzvolumen der WEV bzw. der HV gegenübersteht. Daher mussten die entsprechenden Referenzvolumina doppelt berücksichtigt werden. Bei den in den Tabellen aufgeführten Häufigkeitsangaben [n] handelt es sich deshalb um die eingebrachten Messungen und nicht um die Anzahl der gemessenen Abschnitte. Die foto-optischen, HKS-konformen Abschnittsvolumina wurden nach demselben Verfahren, wie es zuvor für die foto-optisch ermittelten Volumina beschrieben wurde, berechnet. In die Regressionsanalysen mit den foto-optisch ermittelten Stirnflächen wurden dazu jedoch die HKS-konformen WEV-Volumina eingebracht.

Die Abschnittsvolumina der verschiedenen Verfahren werden, wie auch zuvor bei der Analyse der Stirnflächenmessungen, für die drei beschriebenen Untersuchungsebenen – Gesamtkollektiv (Ebene 1), Bildkollektiv (Ebene 2) und Einzelabschnitt (Ebene 3) – miteinander verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Ebene 2 die bildweisen und in der Ebene 3 die einzelabschnittweisen Volumendifferenzen dargestellt werden.

4.3.1 Vergleich der aus den unterschiedlich gemessenen Dimensionsdaten ermittelten Abschnittsvolumina

4.3.1.1 Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)

Für die Abschnittsvolumina, die regressionsanalytisch über die „nicht-optimierten“ foto-optisch ermittelten Stirnflächen berechnet wurden, zeigen sich im Vergleich zu den Volumina der Werkeingangsvermessung für alle Abschnittskollektive zusammengenommen (Ebene 1) folgende Ergebnisse (Tabelle 17).

Tabelle 17: Deskriptive Statistik und t-Test für die „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [m³] (Gesamtkollektiv - Ebene 1)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Volumen WEV	1407	0,182	0,175	0,05	27,5	0,096	0,350	256,21	0,010	n.s.
Volumen ZFV	1407	0,182	0,176	0,04	22,0	0,100	0,351	256,21		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Es zeigt sich bei der gleichen Volumensumme und bei ähnlichen Minimal- und Maximalwerten für beide Verfahren eine geringfügig höhere Standardabweichung für die WEV-Volumina. Der Variationskoeffizient liegt für die Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) um 5,5 %-Punkte über dem Variationskoeffizienten der foto-optisch ermittelten Abschnittsvolumina.

Für die „optimierten“ Abschnittsvolumina zeigen sich im Vergleich zu den Werkeingangsvolumina ähnliche Ergebnisse (Tabelle 18).

Tabelle 18: Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [m³] (Gesamtkollektiv - Ebene 1)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Volumen WEV	1407	0,182	0,175	0,05	27,5	0,096	0,350	256,21	-0,163	n.s.
Volumen ZFV _{opt}	1407	0,182	0,177	0,05	27,5	0,085	0,356	256,33		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Die Volumina beider Verfahren weisen hier die gleichen Variationskoeffizienten (27,5 %) auf. Die Spannweite (Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert) des „optimierten“ Abschnittsvolumens ist größer als bei dem „nicht-optimierten“ Volumen (Tabelle 17).

Der bildweise Vergleich (Untersuchungsebene 2) der ermittelten Abschnittsvolumina wird entsprechend dem bildweisen Vergleich der Stirnflächen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2): Die einzelnen Abschnittsvolumina werden dazu jeweils für das foto-optische Verfahren und die Vergleichsverfahren bildweise aufsummiert und sowohl absolut (in m³) miteinander verglichen als auch prozentual zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die Tabellen mit den prozentualen Abweichungen der verschiedenen Verfahren pro Bild sind im Anhang aufgeführt. Um mögliche Unterschiede zwischen Bildern, die vom Polter an der Waldstraße und von der Lkw-Ladung am Werkseingang aufgenommen wurden, aufdecken zu können, wurden in der Tabelle die Bilder getrennt nach den Aufnahmeorten dargestellt. Unter dem Aufnahmeort „Gesamt“ (unterste Tabellenzeile) sind die Bilder beider Aufnahmeorte zusammen aufgeführt.

Eine vergleichende Betrachtung der Werte der „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina mit den Abschnittsvolumina der WEV ist ebenfalls im Anhang aufgeführt.

Bei der Betrachtung der Differenzen zwischen den bildweisen Abschnittsvolumina zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 19).

Tabelle 19: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³] (Ebene 2)

Variable [m ³]	Aufnahmeort	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (WEV – ZFV _{opt})	Werkseingang	10	-0,003	0,046	0,272	-0,483	0,420	-0,223	n.s.
	Waldstraße	18	-0,005	0,008	0,247	-0,671	0,433		
	Gesamt	28	-0,004	0,036	0,247	-0,671	0,433		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Die Bilder, die am Werkseingang und an der Waldstraße angefertigt wurden, zeigen ähnlich hohe Spannweiten (Differenz zwischen MIN und MAX) in den Differenzen der Volumina bei der Aufnahmeverfahren WEV und ZFV_{opt} .

Die größte Abweichung, die sich für ein Bild ergibt, beträgt ca. $0,7 \text{ m}^3$ (MIN). Einen negativen Wert weist die Volumendifferenz auf, wenn die aufsummierten Abschnittsvolumina der WEV kleiner als die der ZFV sind. Die größte prozentuale Abweichung je Bild beträgt 9,2 % (vgl. Anhang Tabelle 39).

Die entsprechenden Werte für die „nicht-optimierten Abschnittsvolumina“ im Vergleich zu den WEV-Abschnittsvolumina betragen ca. $0,7 \text{ m}^3$ bzw. 9,4 % (vgl. Anhang Tabelle 40 und Tabelle 41)

Die „optimierten“ und „nicht-optimierten“ zweidimensional foto-optischen Abschnittsvolumina zeigen also bezogen auf das WEV-Volumen auf der Ebene der einzelnen Bilder nur geringfügige Unterschiede.

Eine einzelabschnittsweise Betrachtung der errechneten Abschnittsvolumina (Ebene 3) kann durchgeführt werden, indem für jeden Abschnitt die Volumendifferenz zwischen dem WEV-Volumen und dem zugehörigen foto-optischen („optimiert“ – „nicht-optimiert“) Volumen gebildet wird. Anhand der Streuung der Volumendifferenz kann festgestellt werden, welches der beiden foto-optischen Abschnittsvolumina das WEV-Volumen genauer schätzt.

Tabelle 20: Deskriptive Statistik und t-Test für die Volumendifferenz zwischen der WEV und der ZFV („optimiert“ und „nicht-optimiert“) bezogen auf den Einzelabschnitt [m^3] (Ebene 3)

Variable [m^3]	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz Abschnittsvolumina (WEV – ZFV)	1407	0,000	0,000	0,0214	-0,09	0,08	0,338	n.s.
Differenz Abschnittsvolumina (WEV – ZFV_{opt})	1407	-0,001	-0,005	0,0187	-0,07	0,09		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Es ergeben sich ähnlich hohe Spannweiten für die Differenzen zwischen den „optimierten“ ZFV-Abschnittsvolumina und den WEV-Abschnittsvolumina bzw. den „nicht optimierten“ ZFV-Volumina und den WEV-Abschnittsvolumina. Die für die „optimierten“ Abschnittsvolumina errechneten Volumendifferenzen weisen jedoch eine kleinere Standardabweichung auf. Einen signifikanten Unterschied zwischen den dargestellten Volumendifferenzen konnte mittels t-Test für gepaarte Stichproben nicht nachgewiesen werden.

Werden auf der Ebene der Einzelabschnitte (Ebene 3) die Volumina der WEV und der ZFV_{opt} ins Verhältnis gesetzt, so zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 21). Für einen direkten Vergleich mit der in den forstlichen Vermessungsverfahren üblicherweise geforderten Genauigkeit, die sich zumeist auf 95 % der vermessenen Stämme bezieht, sind hier bei der Ergebnisbetrachtung ebenfalls 95 % der ins Verhältnis gesetzten Einzelabschnittsvolumina aufgeführt. Die Ergebnisse für alle Fälle (100 % der Fälle) finden sich im Anhang (Tabelle 42).

Tabelle 21: Deskriptive Statistik für das Verhältnis der Volumina zwischen der WEV und der „optimierten“ ZFV bezogen auf den Einzelabschnitt [%] für 95 % der Fälle (Ebene 3)

Variable [%]	n	\bar{x}	Median	s	S \bar{x}	MIN	MAX
$\left(\frac{\text{Abschnittsvolumina WEV}}{\text{Abschnittsvolumina ZFV}_{opt}} - 1\right) \times 100$	1337	-0,222	-0,320	8,18	0,224	-20,97	20,80

Die Einzelabschnittsvolumina der ZFV_{opt} liegen im Mittel höher als bei der WEV. Für 95 % der ermittelten Volumenverhältnisse ergaben sich Minimal- und Maximalwerte von ca. ± 21 %. Dabei wurde eine Standardabweichung von 8,18 % berechnet.

4.3.1.2 Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Harvestervermessung (HV)

Die foto-optisch ermittelten Abschnittsvolumina, die regressionsanalytisch über die Abschnittsvolumina der WEV hergeleitet wurden, zeigen bei der Gegenüberstellung mit den Abschnittsvolumina der Harvestervermessung folgende Ergebnisse (Tabelle 22).

Tabelle 22: Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [m³] (Ebene 1)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Volumen HV	927	0,164	0,157	0,05	30,5	0,09	0,35	152,30	-13,84	*
Volumen ZFV _{opt}	927	0,178	0,169	0,05	28,1	0,08	0,36	164,72		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Beim Vergleich der in der Harvestervermessung ermittelten Volumina mit den ZFV-Volumina unterscheiden sich die Mittelwerte der „optimierten“ Abschnittsvolumina um 0,014 m³. Der Mittelwertsunterschied zwischen den Abschnittsvolumina beider Verfahren ist signifikant. Die Spannweite (Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert) beträgt für beide Verfahren 0,26 m³. Die Summe aller Abschnitte liegt für das foto-optische Verfahren (ZFV) um 12,42 m³ höher als für die Harvestervermessung (HV).

Die „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina zeigen ein nahezu identisches Ergebnis (vgl. Anhang Tabelle 43).

Bei der bildweisen Betrachtung der ermittelten Abschnittsvolumina zeigt sich dieselbe Tendenz (Tabelle 23).

Tabelle 23 Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvesterermessung (HV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³] (Ebene 2)

Variable [m ³]	Aufnahmeort	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig
Differenz sum. Volumina ($HV - ZFV_{opt}$)	Werks- eingang	5	-0,858	-0,850	0,334	-1,261	-0,507	-0,977	n.s
	Wald- straße	13	-0,626	-0,726	0,484	-1,681	0,049		
	Gesamt	18	-0,690	-0,738	0,451	-1,681	0,049		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Für die Aufnahmen, die von den Poltern an der Waldstraße und von den Lkw-Ladungen am Werkseingang angefertigt wurden, liegen im Mittel die bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina des foto-optischen Verfahrens über den entsprechenden Abschnittsvolumina der Harvesterermessung. Dies lässt sich jeweils an dem negativen Mittelwert zeigen, der aus den bildweisen Differenzen der aufsummierten Abschnittsvolumina beider Verfahren errechnet wurde. Die größte Abweichung beträgt 1,681 m³. Bezogen auf das bildweise aufsummierte Abschnittsvolumen dieser Aufnahme ergibt sich damit eine prozentuale Abweichung zwischen den Volumina beider Verfahren von 16 % (vgl. Anhang Tabelle 45). Die Werte der bildweise aufsummierten, „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina zeigen im Vergleich zu den entsprechenden Abschnittsvolumina der Harvesterermessung Abweichungen in gleicher Höhe (vgl. Anhang Tabelle 44 und Tabelle 46).

4.3.2 Vergleich der verkaufsrelevanten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina

4.3.2.1 Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Werkeingangsvermessung (WEV)

Die HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens wurden ebenfalls regressionsanalytisch über die foto-optisch ermittelten Stirnflächen und die HKS-konform ermittelten WEV-Abschnittsvolumina hergeleitet (vgl. 4.3).

Die Bestelllänge der untersuchten Abschnitte beträgt in dieser Untersuchung fünf bzw. sechs Meter. Das Verkaufsmaß wird in m³ mit mathematischer Rundung auf die zweite Dezimale angegeben. Ein Vergleich der ermittelten Abschnittsvolumina zeigt folgendes Ergebnis.

Tabelle 24: Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens und der HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung [m³] (Ebene 1)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Vol. WEV _{HKS}	1682	0,17	0,16	0,05	29,4	0,09	0,33	282,72	-1,448	n.s.
Vol. ZFV _{opt HKS}	1682	0,17	0,16	0,04	23,5	0,08	0,34	281,55		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Für die 1682 untersuchten Abschnittsmessungen zeigt sich – wie schon zuvor für die Abschnittsvolumina aus den gemessenen Dimensionswerten – ein höherer Variationskoeffizient für die in der Werkeingangsvermessung ermittelten Volumina. Die Standardabweichung sowie die Minimal- und Maximalwerte unterscheiden sich für die Abschnittsvolumina beider Verfahren geringfügig.

Werden diese beiden HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina bildweise betrachtet, so zeigt sich, dass die bildweise berechneten HKS-Volumenunterschiede sich im gleichen Rahmen wie die zuvor dargestellten Unterschiede der Abschnittsvolumina bewegen, die aus den tatsächlich gemessenen Dimensionsdaten der WEV ermittelt wurden (Tabelle 25).

Tabelle 25: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³] (Ebene 2)

Variable [m ³]	Aufnahmeort	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (WEV _{HKS} – ZFV _{HKS opt})	Werkeingang	12	0,06	0,04	0,16	-0,28	0,31	0,389	n.s.
	Waldstraße	20	0,03	0,06	0,23	-0,69	0,38		
	Gesamt	32	0,04	0,05	0,20	-0,69	0,38		

*signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Die Volumendifferenzen zwischen beiden Verfahren erreichen pro Bild bis zu 0,69 m³. Bezogen auf die Aufnahmeeinheit zeigt sich ein maximaler, prozentualer Volumenunterschied von 8,3 % (vgl. Anhang Tabelle 47).

Zwischen den mittleren Volumendifferenzen konnten für die Kollektive Waldstraße und Werkeingang keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Für den Vergleich der HKS-konform ermittelten WEV-Abschnittsvolumina mit den „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten ZFV-Abschnittsvolumina zeichnet sich ein ähnliches Bild ab (vgl. Anhang Tabelle 48 und Tabelle 50).

Beim einzelabschnittswise Vergleich der HKS-konform ermittelten WEV-Volumina mit den entsprechenden „optimierten“ ZFV-Volumina zeigen sich folgende Ergebnisse (Tabelle 26).

Tabelle 26: Deskriptive Statistik für die einzelabschnittsweise Volumendifferenz zwischen der HKS-konform ermittelten WEV und der HKS-konform ermittelten ZFV_{opt} bezogen auf den Einzelabschnitt [m³] (Ebene 3)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX
Differenz Abschnittsvolumina ($WEV_{HKS} - ZFV_{HKS\ opt}$)	1682	0,0007	0,0000	0,0201	28,71	-0,08	0,10

Es ergibt sich bei einer Standardabweichung von 0,02 m³ zwischen den Abschnittsvolumina der WEV und der ZFV ein maximaler Volumenunterschied von 0,1 m³. Die prozentualen Abweichungen, die sich aus dem Verhältnis zwischen den einzelabschnittswise Volumina der WEV_{HKS} und der ZFV_{HKS opt} ergeben, sind nachfolgend dargestellt (Tabelle 27). Da die Genauigkeit forstlicher Vermessungsverfahren zumeist für 95 % der vermessenen Stämme aufgeführt wird, sind zum direkten Vergleich mit der geforderten Genauigkeit diese 95 % der Fälle in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Einzelabschnittsvolumina, die HKS-konform in der WEV und im HKS-konformen „optimierten“ ZFV ermittelt wurden [%] für 95 % der Fälle (Ebene 3)

Variable [%]	n	\bar{x}	Median	s	S \bar{x}	MIN	MAX
$\left(\frac{\text{Abschnittsvolumina } WEV_{HKS}}{\text{Abschnittsvolumina } ZFV_{HKS\ opt}} - 1 \right) \times 100$	1598	0,016	0,000	9,88	0,247	-26,09	26,09

Für 95 % der ermittelten Volumenverhältnisse ergeben sich Volumenunterschiede von bis zu 26,1 %. Die Werte für alle berechneten Einzelabschnittsvolumina (100 %) sind im Anhang (Tabelle 49) dargestellt.

4.3.2.2 Vergleich zweidimensionale foto-optische Vermessung (ZFV) – Kluppung (KL)

Die Ergebnisse der traditionellen Volumenermittlung in der Forstwirtschaft – über die Abschnittslänge und zwei mit Hand geklupperte Mittendurchmesser – werden vergleichend den Ergebnissen der HKS-konform ermittelten „optimierten“ ZFV gegenübergestellt.

Tabelle 28: Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Kluppung (KL) [m³] (Ebene 1)

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Vol. ZFV _{opt HKS}	1682	0,17	0,16	0,04	23,5	0,08	0,34	281,55	-5,464	*
Vol. KL	1682	0,16	0,16	0,05	31,3	0,08	0,31	276,32		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Die Abschnittsvolumina beider Verfahren zeigen neben einem Mittelwertsunterschied von 0,01 m³ einen summarischen Volumenunterschied von 5,3 m³ (1,8 %).

Der Mittelwertsunterschied zwischen beiden Verfahren lässt sich statistisch mittels t-Test absichern. Für die mit der Kluppe ermittelten Volumina ergibt sich ein um ca. 8 %-Punkte höherer Variationskoeffizient.

Die bildweise Betrachtung der Abschnittsvolumina beider Verfahren bestätigt das zuvor dargestellte Ergebnis. Die mittlere Volumendifferenz für die bildweise ermittelten Abschnittsvolumina beider Verfahren zeigt sowohl an der Waldstraße als auch am Werkseingang negative Werte (Tabelle 29). Das bedeutet, dass aus den Kluppdaten im Mittel kleinere Volumina als mit dem ZFV ermittelt wurden.

Tabelle 29: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung (KL) und der „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³] (Ebene 2)

Variable [m ³]	Aufnahmeort	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (KL – ZFV _{HKS opt})	Werkseingang	12	-0,23	-0,22	0,20	-0,51	0,06	-1,188	n.s.
	Waldstraße	20	-0,12	-0,09	0,29	-1,13	0,26		
	Gesamt	32	-0,16	-0,14	0,26	-1,13	0,26		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Es ergibt sich eine Volumendifferenz von bis zu 1,13 m³ pro Bild (10,1 % vgl. Anhang Tabelle 51). Es gibt jedoch auch Aufnahmen, aus denen ZFV-Volumina abgeleitet wurden, die unter den entsprechenden Volumenwerten der Kluppung liegen.

Für die „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des ZFV zeigt sich im Vergleich zu den Volumina der Kluppung ein ähnliches Bild (vgl. Anhang Tabelle 52 und Tabelle 53).

4.4 Diskussion der Abschnittsvolumina

Der Diskussion und Beurteilung der Abschnittsvolumina müssen folgende Überlegungen vorangestellt werden:

Die foto-optisch ermittelten Dimensionsdaten wurden mit Daten verglichen, die in Vermessungsverfahren der forst- und holzwirtschaftlichen Praxis ermittelt wurden. Dabei wurden die Dimensionsdaten (Durchmesser zur Stirnflächenberechnung und Abschnittsvolumina) der Werkeingangsvermessung (WEV) als Referenz herangezogen, da die Werkeingangsvermessung aufgrund ihrer Eichfähigkeit und damit Messsicherheit als ein genaues, praxisingängiges Vermessungsverfahren gilt (DFWR/VDS, 1994).

Die Volumina der Abschnitte wurden in der WEV ebenso wie in den weiteren beschriebenen Verfahren (HV und KL) über die Querschnittsfläche der Abschnitte ermittelt. Die Flächenherleitung erfolgte bei der WEV mittels Kreisflächenformel über die gemessenen Durchmesser. Aus der für diese Untersuchung ausgewerteten Literatur (z.B. MATERN, 1958 UND SMALTSCHINSKI, 1986) geht jedoch hervor, dass bei der Querschnittsflächenermittlung für ovale Stämme mittels Kluppung oder Umfangmaßband über die Kreisflächenformel durchschnittlich eine zu große Querschnittsfläche gegenüber der „wahren“ Querschnittsfläche errechnet wird. Da auch die WEV messtechnisch die Querschnittsfläche über die Durchmesser ermittelt, muss dieser Querschnittsflächenfehler in der Tendenz auch für die WEV unterstellt werden. Bei einer kritischen Betrachtung der in dieser Untersuchung eingesetzten Methodik ist somit zu beachten, dass auch als Referenzmaß (WEV), das für den Vergleich mit dem foto-optischen Messverfahren herangezogen wurde, nicht das physikalisch „wahre“ Volumen ermittelt wurde. Es wird somit in dieser Untersuchung von der aus dem Bild ermittelten foto-optischen Querschnittsfläche auf ein Abschnittsvolumen geschlossen, dass für Abschnitte mit nicht kreisrunden Querschnittsflächen aufgrund der dargestellten Zusammenhänge einen systematischen Messfehler beinhalten kann. Dennoch erweist sich der Einsatz der in der WEV ermittelten Dimensionsmaße als Referenzmaß aufgrund des beschriebenen Genauigkeitsniveaus als sinnvoll. Auch unter der Zielsetzung, mit dem foto-optischen Verfahren ein waldseitiges Kontrollmaß dem von der Holzindustrie ermittelten Dimensionsmaß gegenüberzustellen, scheint der Vergleich mit den Volumenmaßen der WEV notwendig.

Für die Abschnittsvolumina, die mittels der „optimierten“ bzw. der „nicht-optimierten“ Stirnflächen des zweidimensional foto-optischen Verfahrens berechnet wurden, konnte in keinem Fall ein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Es ergeben sich jeweils nur sehr kleine Volumendifferenzen zwischen den Volumina, die anhand der beiden Stirnflächentypen („optimiert“ – „nicht-optimiert“) auf der Ebene 1 (Ge-

samtkollektiv) und Ebene 2 (Bilder) ermittelt wurden. Bei Betrachtung der „optimierten“ und „nicht-optimierten“ Volumina auf diesen Ebenen muss berücksichtigt werden, dass der Anteil der optimierten Stirnflächen sich auf 257 Stirnflächen – dies entspricht einem Anteil von nur 17 % aller gemessenen Stirnflächen – beschränkt.

Dennoch besitzen die „optimierten“ Abschnittsvolumina gegenüber den „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina einen Genauigkeitsvorteil für die Schätzung der WEV-Volumina, der auf der Einzelstammenebene (Ebene 3) zutage tritt. Die Differenzen zwischen WEV-Volumina und „optimierten“ ZFV-Volumina weisen gegenüber den Differenzen zwischen WEV-Volumina und „nicht-optimierten“ ZFV-Volumina eine kleinere Streuung auf ($0,0187 \text{ m}^3$ gegenüber $0,0214 \text{ m}^3$, vgl. Tabelle 20).

Aus der kleineren Streuung ergibt sich für den Einzelabschnitt eine genauere absolute Schätzung des WEV-Volumens anhand des optimierten ZFV-Volumens. Für weitere Anwendungen wäre also der optimierten Stirnflächenermittlung der Vorzug zu geben.

Für die Gesamtkollektive der Abschnitte (Ebene 1) weisen sowohl die sektionsweise gemessenen als auch die HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung im Vergleich zu den Volumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens nur sehr geringfügige Unterschiede auf. Dieses Ergebnis deutete sich aufgrund der in den Regressionsanalysen berechneten hohen Bestimmtheitsmaßen (R^2) an.

Die Volumenunterschiede (0,05 %) zwischen optimierten ZFV-Volumina und gemessenen WEV-Volumina sind also nur gering. Auch für die entsprechenden HKS-konform ermittelten Volumina ergibt sich ein nur geringer Volumenunterschied von 0,4 % (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 24).

D.h.: Anhand der Stirnflächen, die aus den angefertigten Aufnahmen ermittelt wurden, können Abschnittsvolumina regressionsanalytisch hergeleitet werden, die einen sehr guten Schätzwert für die WEV-Abschnittsvolumina darstellen.

Bei dieser summarischen Betrachtung der Abschnittsvolumina (Ebene 1) muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich gegebenenfalls vorhandene bildweise Volumenüberschätzungen und -unterschätzungen gegenseitig aufheben können.

Entsprechende Schätzfehler konnten bereits für die Stirnflächen aufgezeigt werden, doch waren die maximalen Unterschiede zwischen den Stirnflächen (bis zu 11,6 %, vgl. Tabelle 7) größer als zwischen den Volumina (bis zu 9,2 %, vgl. Tabelle 39).

Für die Ebene 2 (Bilder) muss festgehalten werden, dass sich zwischen den optimierten ZFV-Volumina und den WEV-Volumina eine nur geringe mittlere Volumenabweichung von 0,3 % pro Bild, und für die entsprechenden HKS-konform ermittelten Volumina ein ebenfalls

nur geringer mittlerer Volumenunterschied von 0,8 % pro Bild ergibt.

Auf der Ebene der Bilder ergeben sich anhand der WEV-Volumina im Verhältnis zu den „optimierten“ ZFV-Volumina unterschätzende Abweichungen von bis zu -5,8 % und überschätzende Abweichungen von bis zu +5,6 % in 95 % der Fälle (Bilder).

Für den Vergleich der HKS-konform ermittelten Volumina betragen die entsprechenden Abweichungen bis zu -6,1 % bzw. bis zu +4,6 % in 95 % der Fälle (Bilder). Die Forderung der Forstpraxis nach einer Volumenmessgenauigkeit bei Stichprobenverfahren von ± 5 % in 95 % der Fälle (GUGLHÖR ET AL., 1996) wird also beinahe erreicht. Allerdings handelt es sich bei dem hier vorgestellten foto-optischen Verfahren um ein Holzvermessungsverfahren, das nicht stichprobenartig arbeitet, sondern eine Vollerhebung darstellt. Da jedoch dieses Holzvermessungsverfahren auch im Hinblick auf einen Einsatz als „Waldkontrollmaß“ entwickelt wurde, ist es sinnvoll, die für derzeit in der forstlichen Praxis eingesetzten Stichprobenverfahren geforderte Volumenmessgenauigkeit mit der Genauigkeit dieses Verfahrens zu vergleichen.

Die Volumenmessgenauigkeit für ein in der forstlichen Praxis eingesetztes Stichprobenverfahren (Sektions-Raummaßverfahren), in dem über das aufgenommene Raummaß ein Festmaß ohne Rinde ermittelt wird, beschreiben WILWERDING UND GROß (1996). Sie errechnen bei 75 % der Polter eine Volumengenauigkeit von ± 5 % für das errechnete Festmaß gegenüber dem Volumenmaß der WEV. Der SCHWEDISCHE RAT FÜR HOLZVERMESSUNG (1999) fordert für Holzpartien zwischen 10 m³ und 50 m³ in Abhängigkeit von der Partiegröße eine Volumengenauigkeit von ca. $\pm 5,5$ % bis ± 4 %.

In dieser Untersuchung besitzen die Holzpolter an der Waldstraße und die Transport-Ladungen auf dem Lkw am Werkseingang ein durchschnittliches „Bild“-Volumen von 9,2 m³. Für dieses Polter- bzw. Ladungsvolumen liegen die Volumenabweichungen dieses Verfahrens mit den berechneten -5,8 % bis +5,6 % geringfügig über den vom SCHWEDISCHEN RAT FÜR HOLZVERMESSUNG (1999) erlaubten Abweichungen von $\pm 5,5$ %.

Beim einzelabschnittweisen Vergleich (Ebene 3) der Abschnittsvolumina sind die ermittelten prozentualen Abweichungen zwischen WEV- und ZFV-Volumina größer als bei der bildweisen Betrachtung. Für 95 % der Fälle wurde bei einer Streuung von 8,2 % eine über- und unterschätzende Abweichung von bis zu 21 % berechnet. Diese größeren Volumenabweichungen auf Ebene 3 gegenüber der Ebene 2 lassen sich wie folgt erklären: Wird die Punktelwolke betrachtet, die sich in einem Streudiagramm über den beiden Achsen „foto-optische Abschnittsstirnfläche“ und „WEV-Volumen“ ergibt, und wird die zugehörige Regressionsgerade, die in einer Regressionsanalyse ermittelt wurde, eingezeichnet, so ergeben sich aufgrund der Streuung vereinzelt Abschnitte, die deutlich von der Regressionsgeraden

abweichen. Für diese Abschnitte errechnen sich foto-optische Volumina, die sich von den zugehörigen WEV-Volumina stark unterscheiden und somit zu erheblichen Volumenabweichungen führen. Da zudem einige Abschnitte (Punkte) über bzw. unter der Regressionsgeraden liegen, ergeben sich sowohl zu große als auch zu kleine foto-optische Volumina im Vergleich zu den WEV-Volumina. Diese Über- und Unterschätzungen gleichen sich bei der Zusammenfassung zu Bild-Kollektiven (Ebene 2) aus.

Für das Verhältnis der HKS-konform ermittelten Volumina ergibt sich eine leicht höhere Streuung (9,9 % bei Minimal- und Maximalwerten von $\pm 26,1$ %) (vgl. Tabelle 27).

Die Streuungen zwischen den HKS-konform ermittelten Volumina sind größer als zwischen den vermessenen Volumina, da die statistischen Zusammenhänge zwischen Stirnflächen und den Volumina, die über die Durchmesser in der Mitte der Abschnitte ermittelt wurden, schwächer sind. Die schwächeren statistischen Zusammenhänge können dadurch erklärt werden, dass zu Stirnflächen, die in ihrer Größe variieren können, dieselben HKS-konform ermittelten Volumina berechnet wurden. Zusätzlich ergeben sich für Abschnitte, die nach der WEV ein unterschiedliches Volumen besitzen, aufgrund der Rundung der Mittendurchmesser dieselben HKS-konform ermittelten Volumina.

Für 80 % der vermessenen Abschnitte zeigt sich für das Verhältnis zwischen HKS-konform ermittelten WEV-Volumen und ZFV-Volumen der einzelnen Abschnitte jedoch nur eine Streuung von 6,9 %.

Es muss beachtet werden, dass diese Ergebnisse nur für die untersuchten Abschnittskollektive festgestellt werden können. Eine Prüfung (Validierung) der regressionsanalytisch gewonnenen Ergebnisse mit Abschnitten, deren Dimensionsdaten nicht in die Regressionsanalyse eingebracht wurden, ist zweckmäßig. Die regressionsanalytisch hergeleiteten Zusammenhänge zwischen den foto-optischen ermittelten Abschnitts Stirnflächen und den WEV-Volumina konnten jedoch nicht an einer weiteren Stichprobe (d.h. an zusätzlichen Abschnitten) überprüft werden.

Dennoch scheint eine Übertragung der Ergebnisse dieser Untersuchung auf weitere Abschnittskollektive möglich, da die für diese Untersuchung ausgewählten Bestände als typisch hinsichtlich der Praxis der Durchforstung und Vorratspflege gelten können.

Werden die Volumina der Harvestervermessung und der ZFV miteinander verglichen, so zeigen sich sowohl summarisch als auch bildweise im Mittel höhere foto-optisch ermittelte Volumina (vgl. Tabelle 22 und Tabelle 23).

Die aufgetretenen Unterschiede lassen sich wie folgt erklären: Die foto-optischen Abschnitts-

volumina wurden regressionsanalytisch über die WEV-Volumina hergeleitet und stehen somit auch in Abhängigkeit von den in der WEV ermittelten Durchmessern und der Abschnittslänge.

In der Harvestervermessung wurde eine mittlere Abschnittslänge von 5,19 m ermittelt, in der WEV hingegen eine mittlere Länge von 5,21 m. Über Differenzen in der Längenvermessung, die sich zwischen Harvestervermessung und einem Referenzmaß ergeben, berichten u.a. BUSCH ET AL. (1996) und BECKER ET AL. (1999). BUSCH ET AL. (1996) zeigen beim Vergleich der Werkeingangs- mit der Harvestervermessung einen mittleren Abschnittslängenunterschied von 4,2 cm und 4,4 cm. BECKER ET AL. (1999) ermitteln einen mittleren Längenunterschied zwischen Harvestervermessung und Handvermessung mit Maßband von -3,8 cm bis 2,1 cm. Aus der im Mittel 2 cm größeren Abschnittslänge der WEV ergeben sich somit auch höhere WEV- Abschnittsvolumina.

Die Volumendifferenzen beider Verfahren müssen deshalb unter Berücksichtigung der Längenunterschiede interpretiert werden. Zusätzlich können sich aufgrund der Durchmessererfassung des Harvesters im Vergleich zu der WEV, die wie eine berührungslose kreuzweise Klappung funktioniert, vor allem bei ovalen Stämmen größere Abweichungen ergeben (BECKER ET AL., 1999).

Bei den Abschnittsvolumina, die HKS-konform über die gekluppten Mittendurchmesser und über die Soll-Abschnittslängen fünf und sechs Meter (Bestelllängen) ermittelt wurden, zeigt sich summarisch über alle Kollektive hinweg im Vergleich zu den foto-optisch ermittelten Volumina eine Volumendifferenz von 1,9 % und bildweise ein maximaler Volumenunterschied von bis zu 10,1 %.

Die geringen Volumenunterschiede zwischen beiden Verfahren sind darauf zurückzuführen, dass in beiden Verfahren die erhobenen Mittendurchmesser verfahrenähnlich erhoben wurden und die Abschnittslängen (fünf und sechs Meter) gleich sind. Innerhalb des Messverfahrens „Klappung“ wurden die Abschnittsvolumina über die in der Abschnittsmitte doppelt erhobenen Durchmesser berechnet. Die foto-optischen Abschnittsvolumina wurden ebenfalls aus den HKS-konformen Mittendurchmessern berechnet – allerdings nur indirekt über HKS-konform ermittelte WEV-Volumina im Rahmen der Regressionsanalyse.

4.5 Ergebnisse Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung

Neben den Abschnittsvolumina, die zur Abrechnung der bereitgestellten Holzmenge in der forst- und holzwirtschaftlichen Praxis zumeist summarisch für ein Abschnittskollektiv berechnet werden, dient die Durchmesserverteilung als wichtige Kennzahl dieses Kollektivs.

Die Einteilung der Abschnitte in zentimeterweise Durchmesserklassen erfolgt anhand des

Mittendurchmessers. Der Mittendurchmesser wird in der WEV exakt vermessen.

Im ZFV kann dieser Durchmesser nicht direkt erfasst werden, da die Aufnahmen von den Stirnseiten der Abschnitte angefertigt werden und der Mittendurchmesser nicht einsehbar ist. Deshalb wurde in dieser Untersuchung anhand der Abschnittslänge und der ermittelten Abschnittsvolumina ein mittlerer Durchmesser des Abschnitts berechnet. Dieser mittlere Durchmesser wurde dem in der WEV gemessenen Mittendurchmesser vergleichend gegenübergestellt (Abbildung 32).

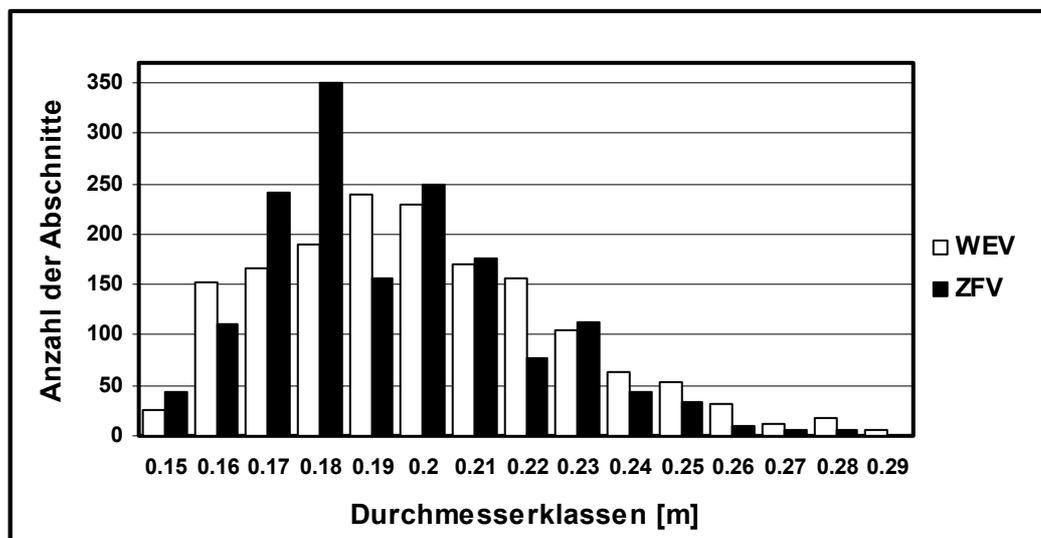


Abbildung 32: Zuordnung der Abschnitte zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV

Für die Durchmesserklasse „0,17 m“ und „0,18 m“ liegt die Anzahl der Abschnitte für die ZFV weit über, für die Durchmesserklassen „0,19“ und „0,22 m“ deutlich unter der Anzahl, die sich aus der WEV ergibt.

Der Chi-Quadrat-Test (Anhang: Tabelle 54 und Tabelle 55) bestätigt, dass ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Stückzahlen in den Durchmesserklassen für die beiden beschriebenen Verfahren besteht. Wird für jeden Abschnitt die Differenz zwischen dem mittleren Durchmesser des ZFV und dem Mittendurchmesser der WEV gebildet, so zeigt sich für die WEV ein um 0,6 cm höherer Mittendurchmesser (vgl. Anhang Tabelle 56). Dies gilt im Übrigen sowohl für Fichtenabschnitte mit der Länge von 5 m als auch von 6 m (Anhang: Abbildung 45 und Abbildung 46).

Werden die ermittelten Durchmesser zu Stärkeklassen nach HKS zusammengefasst, zeigen sich folgende Verteilungen (Abbildung 33).

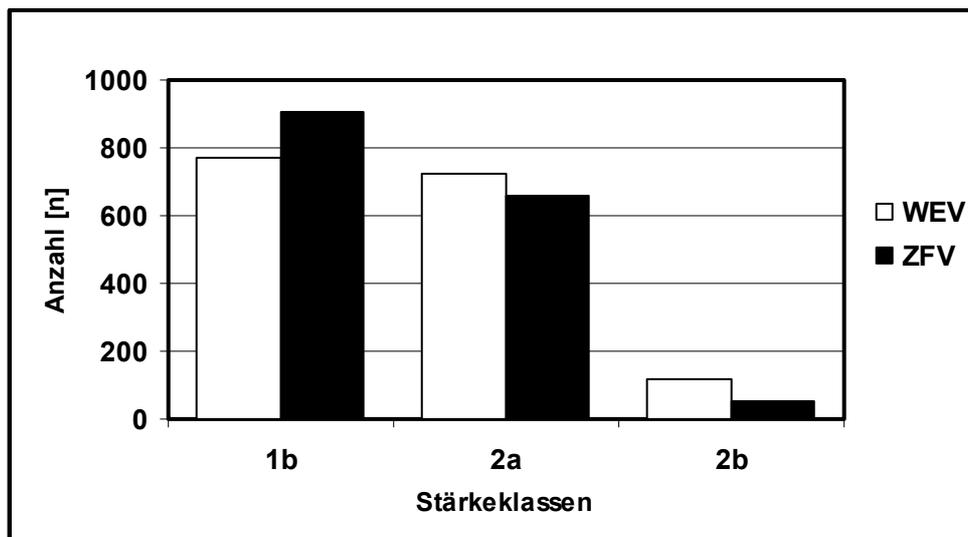


Abbildung 33: Zuordnung der Abschnitte zu den Stärkeklassen nach WEV und ZFV

Die Anzahl der Abschnitte in einer Stärkeklasse unterscheidet sich zwischen beiden Verfahren um maximal 131 Abschnitte. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass ein Überschuss (ZFV gegenüber WEV) in der Stärkeklasse 1b durch ein Defizit in den Klassen 2a und 2b stückzahlenmäßig kompensiert wird.

4.6 Diskussion Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung

Die Anzahl der Abschnitte, die den einzelnen Durchmesser- und Stärkeklassen zugeordnet wurde, variiert deutlich und ist auf die Grenzen der Durchmesser- und Stärkeklassen zurückzuführen.

Der mittlere Mittendurchmesser der WEV (19,9 cm) liegt über dem mittleren Durchmesser, der im ZFV (19,3 cm) berechnet wurde. Die Differenz beträgt 0,6 cm bei einer Standardabweichung von 1,3 cm. Dieser Unterschied liegt im dem Bereich, den auch GUGLHÖR (1994) beschreibt. Beim Vergleich der aus einem Stichprobenverfahren und einer Werkeingangsvermessung ermittelten Mittendurchmesser weist er zwischen den Durchmessern im Mittel eine Differenz von 0,01 cm und 1,5 cm auf. BUSCH ET AL. (1996) zeigen beim Vergleich der mittleren Durchmesser, die in einer Harvester- und Werkeingangsvermessung ermittelt wurden, mittlere Unterschiede zwischen 0,1 cm und 0,2 cm auf. HASSENSTEIN UND HEIL (1996) ermitteln bei einer vergleichenden Untersuchung zwischen einer manuellen Vermessung und einer Werkeingangsvermessung von Nadelrundholzabschnitten eine mittlere Abweichung des Mittendurchmessers von 0,5 cm.

Da mit stärkeren Stammdimensionen der Holzpreis pro m³ steigt, wäre anhand der ermittelten Dimensionsmaße der WEV im Vergleich zu den Dimensionsmaßen des ZFV aus Sicht des Holzverkäufers ein besseres Verkaufsergebnis erzielt worden.

4.7 Stückzahl

Für die Stückzahl der aus dem Foto ermittelten Abschnitte kann anhand dieser Untersuchung folgende Aussage getroffen werden: Die Stückzahl der Abschnitte in den Lkw-Ladungen kann immer exakt bestimmt werden, an der Waldstraße ist die Bestimmung der Abschnittsstückzahl im Polter abhängig von der Polterqualität und der Poltergröße.

Bei Poltern, bei denen die Abschnitte an der Waldstraße ohne Unterlage gepoltert wurden, konnten vereinzelt bodennahe Abschnittsstirnflächen teilweise oder ganz verdeckt sein. In diesem Fall ist ein korrektes Abzählen der Abschnittsstückzahl anhand des Fotos nicht möglich.

Ein direkter Stückzahlvergleich der an der Waldstraße und am Werkseingang fotografierten Abschnitte mit der Anzahl der im Werk vermessenen Abschnitte konnte in dieser Untersuchung nicht durchgeführt werden, da nicht alle fotografierten Abschnitte im Zuge der WEV aufgenommen werden konnten.

Für die Poltergröße gilt: Muss ein Polter aufgrund seiner Größe mehrfach fotografiert werden, so ist eindeutig festzulegen, in welchem Foto ein bestimmter Abschnitt gezählt wird, um Doppelzählungen zu vermeiden. In dieser Untersuchung wurde durch die einzelstammweise Markierung der Abschnitte eine Doppelzählung der Abschnitte ausgeschlossen.

5 Abschließende Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick

Hier soll zunächst beurteilt werden, ob gemäß der Zielsetzung mit einem kombinierten Verfahren aus foto-optischer Aufnahme und computergestützter Auswertung eine Ermittlung produkt- und produktionsrelevanter Dimensionsmerkmale technisch möglich ist. Dabei wird die Hard- und Software dieses Vermessungsverfahrens auch im Hinblick auf den Aufwand, den diese Technik bei ihrer Anwendung erfordert, diskutiert.

In einem zweiten Schritt wird die Messgenauigkeit des zweidimensionalen, foto-optischen Verfahrens (ZFV) beurteilt. Als Vergleichsmaße für die fotografierten Abschnitte dienen hierbei die Dimensionsmaße, die innerhalb einer Werkeingangsvermessung (WEV), einer Harvestervermessung (HV) und einer manuellen Vermessung mit Kluppe (KL) ermittelt wurden. Zusätzlich werden die zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen für einen Genauigkeitsvergleich mit einem dreidimensionalen (stereo-photogrammetrischen), foto-optischen Verfahren (DFV) vermessen.

Das zweidimensionale, foto-optische Messverfahren (ZFV) wird hinsichtlich der ermittelten Stückzahl, der Abschnittsvolumina und der Durchmesser- bzw. Stärkeklassenverteilung mit den in der forst- und holzwirtschaftlichen Praxis bestehenden Genauigkeitsanforderungen verglichen. Da die Abschnittsvolumina über die Abschnittslängen und -stirnflächen berechnet werden, ist auch eine Genauigkeitsbetrachtung der ermittelten Abschnittslängen (Vergleich WEV und HV) und der -stirnflächen notwendig.

Ein Teil der eingesetzten Techniken und Routinen kann ohne weitere Modifikationen direkt in einem praxistauglichen Verfahren eingesetzt werden. Einige Verfahrensbestandteile bedürfen einer Weiterentwicklung, um in einem praxistauglichen Vermessungsverfahren eingesetzt werden zu können. Abschließend werden daher mögliche Verfahrensmodifikationen und Softwareentwicklungen beschrieben, die für eine Einführung des Verfahrens in der Vermessungspraxis notwendig sind.

Foto-optische Aufnahmeverfahren

Mit dem entwickelten, zweidimensionalen foto-optischen Aufnahmeverfahren (ZFV) konnten mittels der eingesetzten Kamera, des Maßstabs und der gewählten Aufnahmebedingungen Bilder von Holzpoltern bzw. Holzladungen (Abschnittsstirnflächenkollektiven) angefertigt werden, die den Anforderungen der Bildauswertung hinsichtlich Bildqualität, Format und Detailgenauigkeit genügten.

Zusätzlich zur zweidimensionalen, foto-optischen Vermessung wurde ein Teilkollektiv der Holzpolter im Rahmen eines dreidimensional foto-optischen Aufnahmeverfahrens (DFV) stereo-photogrammetrisch aufgenommen, um Abschnittsstirnflächen unabhängig von ihrer Lage

im Polter bzw. von ihrer jeweiligen Entfernung zum Objektiv bzw. von dem in der Bildebene angebrachten Maßstab vermessen zu können. Der Versuchsaufbau zur stereophotogrammetrischen Fotonahme wurde nach den Überlegungen von KOCH und REIDELSTÜRZ (1998) konzipiert und erforderte gegenüber dem zweidimensionalen foto-optischen Versuchsaufbau Modifikationen im Aufnahmeverfahren. Für diese Aufnahmen musste ein spezielles Maßstabssystem konzipiert werden, das dann auch zu Versuchszwecken für das zweidimensionale Aufnahmeverfahren eingesetzt wurde.

Bei der nachfolgenden Diskussion der eingesetzten Technik wird der Schwerpunkt allerdings auf das zweidimensionale Aufnahmeverfahren gelegt, da dessen Entwicklung im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht. Das dreidimensionale Aufnahmeverfahren dient hingegen als Vergleichsverfahren zur Beurteilung der Messgenauigkeit. Aufgrund des erheblich größeren Mess- und Auswertungsaufwands, den das dreidimensional foto-optische Vermessungsverfahren erfordert, kommt es zudem als Messverfahren für die forstliche Praxis kaum in Frage.

Kamera

Für das zweidimensional foto-optische Verfahren wurde eine Digitalkamera eingesetzt. Die Auflösung der eingesetzten Kamera (3,34 Megapixel) war hinreichend für ein genaues Anvisieren der Maßstabseckpunkte im Bild. Der Einsatz kalibrierter Kameras war für die bildweise Volumenermittlung nicht zwingend erforderlich, wie die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen. Eine Kamerakalibrierung ermöglicht jedoch eine Abschätzung der Abbildungsfehler, die unter den definierten Aufnahmebedingungen auftraten.

Als problematisch beim Einsatz der Kamera erwies sich die Brennweiteinstellung der Kamera. Die eingesetzte Kamera, bei der die vorgegebene Brennweite vor jeder Aufnahme manuell eingestellt werden musste, erschwerte die Kamerahandhabung im Aufnahmeverfahren und erhöhte die Aufnahmezeit. Zusätzlich ergaben sich zeitliche Verzögerungen aufgrund der kamerainternen Speicherdauer der angefertigten Bilder. Mittlerweile sind digitale Spiegelreflexkameras auf dem Markt, bei denen diese Nachteile nicht mehr auftreten.

Maßstab

In dieser Untersuchung wurden zwei Arten von Maßstäben bei der Bildnahme eingesetzt: Maßstäbe, die einen Teil des aufzunehmenden Bildobjekts darstellten (z.B. amtliches Kfz-Zeichen des transportierenden Lkws) und Maßstäbe, die am Bildobjekt positioniert wurden. Es zeigte sich, dass für ein praktisches Verfahren nur dann ein Bestandteil des aufzunehmenden Objekts als Maßstab eingesetzt werden kann, wenn die Maßstabsentfernung und die Entfernung der aufzunehmenden Abschnittsstirnflächen übereinstimmen oder für jede Aufnahme in einem bekannten Entfernungsverhältnis stehen. Beim Einsatz des amtlichen

Kfz-Zeichens als Maßstab wurde deutlich, dass die Entfernungen zwischen Maßstab und aufzunehmenden Objekten (Abschnittsstirnflächen) bei den angefertigten Aufnahmen sich stark unterschieden. Maßstäbe, die direkt am aufzunehmenden Objekt positioniert wurden, erwiesen sich als vorteilhaft: Die als Maßstab im zweidimensional foto-optischen Verfahren eingesetzten, genormten Markierungen (Schilder), die direkt an der zu fotografierenden Bildebene (Ladung) angebracht wurden, besaßen gegenüber einem alternativ im Zusammenhang mit der dreidimensionalen, photogrammetrischen Vermessung geprüften Passpunktsystem aus Nivellierlatten den Vorteil, dass sie ohne weiteren Messaufwand im Bildauswertungsverfahren zur Verfügung standen. Die Passpunkt-Nivellierlatten mussten zudem im Wald mittels Stativen in der Entfernung der anvisierten Bildebene (zumeist auf den Holzpoltern) platziert werden. Ein stabiles und exakt positioniertes Aufstellen der Stativ auf der Polteroberfläche erwies sich als schwierig.

Manuelle und automatisierte Bildauswertungsverfahren

Die eingesetzten manuellen Bildauswertungsverfahren erlaubten unter Laborbedingungen eine hinreichend genaue Berechnung der fotografierten Abschnittsstirnflächen und der Maßstabsflächen (Kapitel 4.1.3).

Dabei zeigte sich, dass ein fehlerhaftes Abgreifen des Umrisses kleiner Maßstabsflächen – wie sie die Flächen der eingesetzten Markierungen darstellen – eine ungünstigere Fehlerfortpflanzung bei der Maßstabsflächenberechnung verursachte als beim beschriebenen Passpunktsystem mit Nivellierlatten. Im Bild angebrachte Maßstabsflächen sollten also möglichst groß sein.

Mit dieser manuellen Bildauswertungsroutine gelang auch die Delinierung der Stirnflächen, obwohl Stirnflächenverschmutzungen, abgeplatzte Rinde, die über den Stirnflächen hing, und gegenseitige Beschattung der Stirnflächen bei unbündiger Lagerung der Abschnitte die Delinierung erschwert. Es stellte sich heraus, dass diese optischen Beeinträchtigungen vom Anwender erkannt, berücksichtigt und ausgeglichen werden konnten.

Die Entwicklung der Auswertung in Richtung eines halb- bzw. vollautomatisierten Bildverarbeitungsverfahrens wurde nach zwei alternativen Konzepten vorgenommen: Mittels „Aktiver Konturenmodelle“ („snakes“) und mit dem kommerziellen Bildanalysesystem *Halcon*. Mit beiden Routinen gelang eine halb- bzw. vollautomatisierte Delinierung der Stirnflächen in zufrieden stellender Weise. Der Ansatz der „Aktiven Konturenmodelle“ erfordert vom Nutzer zur Delinierung der Stirnflächen ein interaktives „Anklicken“ dieser Stirnflächen. Die Routine *Halcon* erlaubte nach Einlesen des Bildes eine vollautomatisierte Delinierung der Stirnflächen. Verschmutzte und mit Rinde bedeckte Stirnflächen wurden von der erstgenannten

Routine erst nach mehrfachem manuellem Ansetzen, dann aber zumeist zufrieden stellend deliniert. Das Bildanalyseprogramm *Halcon* delinierte diese Stirnflächen teilweise fehlerhaft.

Als Vorstufe zur Volumenermittlung über die foto-optisch ermittelten Stirnflächen war es notwendig, diese im Versuch eindeutig als Fuß- oder Zopfstirnflächen anzusprechen. Im Wald gelang dies durch eine einheitliche Polterrichtung der Abschnitte immer, in der Lkw-Ladung wurden die Abschnittsstirnflächen im Versuch über eine verschiedenfarbige Nummerierung der Fuß- und Zopfenden eindeutig angesprochen.

Bei Herleitung der Abschnittsvolumina über die Stirnflächen stellte sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen diesen beiden Abschnittsgrößen. Da die Abschnitte unterschiedliche Querschnittsformen entlang ihrer Stammlängsachse aufwiesen, wurde untersucht, ob sich ein Zusammenhang zwischen der Form der Abschnittsstirnfläche und dem Abschnittsvolumen ergibt. Dazu war es notwendig, die Abschnittsstirnflächen vorgegebenen visuellen Mustern zuzuordnen, d.h. ihre Form zu klassifizieren. Zusätzlich wurden ausgewählte mathematische Stirnflächenvariablen hergeleitet und geprüft, ob diese Stirnflächenvariablen sich als objektive Weiser zur Charakterisierung der Stirnflächenform eignen und ein Klassifikationsergebnis der Stirnflächen ermöglichen, das mit der visuellen Klassifikation übereinstimmt.

Für das vorliegende Versuchsmaterial erwies sich eine Variable, die über die Fehlervarianzen zweier Stirnflächenpolygonzüge errechnet wurde, als bester Weiser für die Form der Abschnittsstirnflächen. Anhand der mit dieser Variablen durchgeführten Klassifikation der Abschnittsstirnflächen nach ihrer Form (Formklassen: „rund“, „unrund“ und „Stirnfläche mit Wurzelanlauf“) konnte auch die Arbeitshypothese gestützt werden, dass die Differenz zwischen den Stirnflächen, die in der Werkeingangsvermessung und im foto-optischen Verfahren ermittelt wurden, von der Stirnflächenform abhängt.

Als Vorstufe zu einer automatisierten Volumenermittlung auf Basis der foto-optischen Abschnittsstirnflächen wurde eine geometrisch konstruierte Stirnfläche gesucht, die das zur Stirnfläche zugehörige Abschnittsvolumen genauer schätzte als die foto-optisch ermittelte Stirnfläche selbst. Dieser Vorgang, der als Stirnflächenoptimierung bezeichnet wurde, erfolgte auf Basis der zuvor beschriebenen Stirnflächenklassifikation. Für die Teilkollektive der „unrunden“ Stirnflächen und der „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ konnte eine Optimierung der Stirnflächen durchgeführt werden, aus der sich allerdings nur kleine Genauigkeitsvorteile für die Abschnittsvolumenschätzung ergaben.

Messgenauigkeit des foto-optischen Vermessungsverfahrens

Die Genauigkeit des foto-optischen Verfahrens wurde anhand der ermittelten Stückzahl, der Abschnittsvolumina, der Durchmesser- und der Stärkeklassenverteilung der

Abschnitte beurteilt. Da die Abschnittsvolumina über die Stirnflächen und die Abschnittslängen hergeleitet wurden, waren diese beiden Abschnittsgrößen ebenfalls Gegenstand der Genauigkeitsbeurteilung.

Für die Holz-Ladungen auf dem Lkw konnte anhand der angefertigten Bilder die Stückzahl der Abschnitte immer exakt ermittelt werden. An der Waldstraße konnte die Stückzahl der Abschnitte anhand des Bildes dann exakt bestimmt werden, wenn die Abschnittspolter bündig und auf festem Untergrund oder auf Unterlagen lagerten und so verhindert wurde, dass die bodennahen Abschnitte nicht verdeckt wurden. Bei der halb- bzw. vollautomatisierten Delinierung der Stirnflächen einer Ladung bzw. eines Polters ergibt sich die Stückzahl „automatisch“ anhand der erkannten Objekte.

Eine Längenvermessung der Abschnitte war anhand der angefertigten Aufnahmen in dieser Untersuchung nicht vorgesehen, da das foto-optische Verfahren für Rundholzabschnitte in Standardlängen entwickelt werden sollte. Für die Analysen und Berechnungen in diesem Versuch wurden die Längen der fotografierten Abschnitte bei der opto-elektronischen Werkeingangsvermessung und bei der mechanisch-hydraulischen Harvestervermessung ermittelt. Der Vergleich dieser beiden Abschnittslängenerhebungen zeigte, dass die mittels Harvester vermessenen Abschnitte im Mittel 2 cm kürzere Längen aufwiesen als die Maße der Werkeingangsvermessung. BUSCH ET AL. (1996) berichten ebenfalls von einem Abschnittslängendifferenz zwischen Werkeingangs- und Harvestervermessung. Sie stellten im Mittel um 4,2 cm bis 4,4 cm längere Abschnitte in der Werkeingangsvermessung fest. Die Längeneinhaltung bei der Harvestervermessung ist unter anderem von Faktoren, wie der Formigkeit der Stämme, dem Saftzustand der Stämme und der Kalibrierung des Harvesteraggregats abhängig (GRUBDORF, 1997a). Als Ermittlungsgrundlage für die Abschnittsvolumenberechnung wurde die in der Werkeingangsvermessung ermittelte Abschnittslänge gewählt, da diese geeichte Technik eine höhere Messsicherheit als die Vermessungstechnik des Harvesters gewährleistet.

Die Abweichung der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen gegenüber den aus den Abschnittsdurchmessern der Werkeingangs- und Harvestervermessung berechneten Stirnflächen beruht auf den unterschiedlichen, eingesetzten Messkonzepten (Pixel-Zählung gegenüber der Durchmesserermittlung), ist aber auch abhängig von der Position der bei der Bildnahme im Vergleich zu der Bildebene (Abschnittstirnflächen) eingesetzten Maßstäbe. Dies zeigte sich beim Vergleich der bildweise zu einer „Gesamtstirnfläche“ aufsummierten Stirnflächen, die von den Poltern an der Waldstraße und den Holzladungen auf den Lkws angefertigt wurden. Aufgrund der an den beiden Aufnahmeorten spezifischen Maßstabspositionen über- bzw. unterschätzten die zweidimensional foto-optischen Stirnflächen die aus den Vergleichsmaßen ermittelten Stirnflächen. Unter Laborbedingungen wurde eine

zweiprozentige Flächenänderung bei einer Differenz von 0,1 m zwischen Objekt- und Maßstabsentfernung (Kapitel 4.2.6) berechnet.

Neben den bildweisen Über- und Unterschätzungen, die sich bei den foto-optisch ermittelten Stirnflächen im Vergleich zu den Stirnflächen der Vergleichsmaße ergaben, konnte gezeigt werden, dass die Stirnflächenunterschiede zwischen den Verfahren auch von den Formen der Abschnitts Stirnflächen abhängen. Für annähernd runde Stirnflächen wurden zwischen dem foto-optischen Verfahren (ZFV) und der Werkeingangsvermessung wesentlich höhere Korrelationskoeffizienten ermittelt als für Stirnflächen mit Wurzelanlauf.

Mit Hilfe der zusätzlichen durchgeführten dreidimensionalen foto-optischen Vermessung konnte zudem nachgewiesen werden, dass die in dieser Untersuchung vorgefundene unbündige Lagerung der Abschnitte im Polter oder in der Holzladung nur eine untergeordnete Rolle für die Ermittlung der Stirnflächen spielte.

Für die Volumengenauigkeit des foto-optischen Vermessungsverfahrens (ZFV) lässt sich folgendes Fazit ziehen: Die Volumina des foto-optischen Vermessungsverfahrens unterscheiden sich zwischen der Ebene der Bild-Kollektive (Ebene 2) geringfügig, auf der Ebene der Einzelabschnitte (Ebene 3) aber deutlicher voneinander. Dadurch, dass auf der Ebene 3 Einzelabschnittsvolumina sowohl überschätzt als auch unterschätzt wurden, verringerten sich bei der summarischen, bildweisen Betrachtung dieser Volumina die Volumendifferenzen zwischen beiden Verfahren. Somit verringern sich die Volumenabweichungen bei der bildweisen Volumenbetrachtung gegenüber der Einzelabschnittsbetrachtung.

Vor dem Hintergrund der Frage, ob das in dieser Untersuchung entwickelte foto-optische Verfahren grundsätzlich als waldnahes Kontrollmaß eingesetzt werden kann, ist besonders die Volumengenauigkeit der Ebene 2 (Bildkollektiv) von Bedeutung, da das Aufnahmeverfahren vorsieht, anhand von nur einer Aufnahme alle Stirnflächen eines Abschnittskollektivs – hier das Holzpolter an der Waldstraße oder die Ladung beim Transport auf dem Lkw – zu erfassen. Das Holzpolter ist somit in diesem Verfahren Aufnahme- und Vermessungseinheit. Die in der deutschen Forstwirtschaft angewandten Stichprobenverfahren, die zum Teil auch als waldnahes Kontrollmaß eingesetzt werden, leiten Poltervolumina über die gezählte Abschnittsstückzahl und mit Hilfe stichprobenartig vermessener Dimensionsmaße ab. Für den Genauigkeitsvergleich mit diesen in der Praxis eingesetzten waldnahen Kontrollvermessungen wurden die hier pro Bild errechneten maximalen Abweichungen auf 95 % aller Fälle bezogen. Die pro Bild aufsummierten, „optimierten“, foto-optisch ermittelten Abschnittsvolumina (ZFV) zeigten im Vergleich zu den pro Bild aufsummierten WEV-Volumina (HKS-konform ermittelten WEV-Volumina) Abweichungen von bis zu -5,8 % (-6,1 %) und bis zu +5,6 % (+4,6 %) in 95 % der Fälle. Diese Volumenabweichung des foto-optischen Verfahrens – bezogen auf die in der Werkeingangsvermessung ermittelten Volumina – lag damit

geringfügig über der Abweichung, die GUGLHÖR (1996) für die Volumengenauigkeit von Stichprobenverfahren ($\pm 5\%$ in 95 % der Fälle) fordert.

Die Volumengenauigkeit des „optimierten“ foto-optischen Verfahrens (ZFV) für den einzelnen Abschnitt (Ebene 3) wurde über den Volumenunterschied zum zugehörigen WEV-Volumen berechnet. Das Verhältnis der einzelnen Abschnittsvolumina streute zwischen foto-optischem Verfahren (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) um 8,2 % (9,9 % für HKS-konform ermittelte WEV-Volumina) in 95 % der Fälle.

Für die durchgeführte mechanisch-hydraulische Harvestervermessung (HV) ergab sich gegenüber dem „optimierten“ foto-optischen Volumen eine bildweise, summarische Volumenabweichung von bis zu 16 %. Insgesamt waren die aus der Harvestervermessung (HV) ermittelten Abschnittsvolumina kleiner als die Abschnittsvolumina der foto-optischen Vermessung (ZFV). Diese Volumenunterschiede werden einerseits auf die zuvor dargestellte unterschiedliche Längenvermessung in der Harvester- (HV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) zurückgeführt. Andererseits wurden die Volumenunterschiede vermutlich durch die unterschiedliche Art der Durchmessererfassung des Harvesters im Vergleich zur Werkeingangsvermessung verursacht. BECKER ET AL. (1999) berichten vor allem bei der Vermessung von ovalen Stämmen von größeren Abweichungen im Durchmessermaß zwischen Harvester- und Werkeingangsvermessung.

Die Volumenmaße der manuellen, einzelstammweisen Vermessung mit der Kluppe (KL) zeigten im Vergleich mit den „optimierten“ foto-optischen Volumenmaßen (ZFV) bildweise, summarische Volumenabweichungen von bis zu 10,1 %. Zudem wurde zwischen beiden Verfahren nur ein geringfügiger mittlerer Unterschied im Abschnittsvolumen ermittelt. Diese geringen Volumenunterschiede zwischen beiden Verfahren lassen sich wie folgt erklären: Die Volumina der Abschnitte wurden mit Dimensionsmaßen, deren Erhebung sich in beiden Verfahren hinsichtlich der Messmethodik kaum unterscheidet, berechnet. Im Vermessungsverfahren „Kluppung“ wurden die HKS-konformen Volumina über die Abschnittslängen fünf und sechs Meter und die in einer Kreuzkluppung ermittelten mittleren Mittendurchmesser berechnet. Die HKS-konformen, foto-optisch ermittelten Abschnittsvolumina wurden regressionsanalytisch aus den HKS-konformen Volumina der Werkeingangsvermessung ermittelt, die wiederum aus den Abschnittslängen fünf und sechs Meter und den mittleren Mittendurchmessern einer HKS-konformen Werkeingangsvermessung hergeleitet wurden. Die Art der Durchmesserermittlung bei der Kluppung und bei der HKS-konformen Werkeingangsvermessung unterscheidet sich kaum, da in der Werkeingangsvermessung mit der eingesetzten Vermessungstechnik eine „optische Kreuzkluppung“ am Stamm simuliert wird. Es ist allerdings zu beachten, dass im Vermessungsverfahren „Kluppung“ von den erhobenen Durchmesserwerten ein pauschaler Rindenabzug vorgenommen wurde, während in der

Werkeingangsvermessung die Mittendurchmesser am entrindeten Stamm gemessen wurden.

Für die Genauigkeit der in dem zweidimensional foto-optischen Verfahren (ZFV) ermittelten Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung lässt sich folgendes Fazit ziehen:

Es wurde einzelstammweise die Differenz zwischen dem mittleren Abschnittsdurchmesser (ZFV) und dem Abschnittsmittendurchmesser (WEV) gebildet. Für die einzelstammweisen Differenzen ergab sich eine mittlere Differenz im Durchmesser von 0,6 cm (WEV: 19,9 cm; ZFV: 19,3 cm) und eine Streuung von 1,3 cm. Die Abschnittsanzahl, die den einzelnen Durchmesserklassen und Stärkeklassen (1b bis 2b) zugeordnet wurde, variierte jedoch bedingt durch die diskreten Klassengrenzen zwischen foto-optisch ermittelten Abschnittsdurchmessern und den Abschnittsdurchmessern der Werkeingangsvermessung.

GUGLHÖR (1994) berichtet beim Vergleich eines Stichprobenverfahrens und der Werkeingangsvermessung über eine Differenz im mittleren Durchmesser zwischen 0,01 cm und 1,5 cm. Die Stärkeklassenverteilungen zeigten, wie auch in dieser Untersuchung, signifikante Unterschiede.

Anhand der aufgezeigten, bildweisen Volumenmessgenauigkeit des hier entwickelten foto-optischen Verfahrens im Vergleich zu den beschriebenen bisher üblichen Verfahren ist festzuhalten, dass ein Einsatz des foto-optischen Vermessungsverfahrens in der Praxis grundsätzlich möglich ist. Bei der Stückzahlermittlung hat das hier vorgestellte foto-optische Verfahren als Vollaufnahme gegenüber einem Stichprobenverfahren den Vorteil, dass im Rahmen einer Automatisierung des Verfahrens die aufwendige Stückzahlerhebung per Hand am Polter entfällt. Somit ergibt sich beim Anfall großer Holzmengen, wie z.B. nach Sturmkatastrophen, bei der Stückzahlerhebung des Holzes eine wesentliche Zeitersparnis, die sich in geringeren Kosten für die Holzaufnahme niederschlägt. Zudem ergibt sich bei dem foto-optischen Verfahren ein größeres Zeitfenster zur Vermessung des Holzes, da das Holz gepoltert aufgenommen wird und zur einzelstammweisen Aufnahme nicht die meist relativ kurze Zeitspanne zwischen Fällung und Bringung bzw. Poltern genutzt werden muss.

Für die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf eine breite Praxisanwendung lässt sich folgendes Fazit ziehen:

Das in dieser Arbeit vermessene umfangreiche Versuchsmaterial wurde aus zwei Beständen gewonnen, die als typisch hinsichtlich der Praxis der Durchforstung und Vorratspflege gelten können. Deshalb wird angenommen, dass die in dieser Untersuchung ermittelten Zusammenhänge zwischen Abschnittsstirnflächen und Abschnittsvolumina auf andere Abschnittskollektive, die ähnliche Dimensionen aufweisen, übertragen werden können. Die in dieser Untersuchung auf statistischem Wege hergeleiteten Zusammenhänge zwischen Abschnittsstirnflächen und Abschnittsvolumina sollten jedoch an einem größeren Abschnittskollektiv

validiert werden. Anhand der Stirnflächenmessungen eines weiteren Abschnittskollektivs sollte also überprüft werden, ob auf Grundlage der Zusammenhänge zwischen den Stirnflächen und den Volumina, die in dieser Untersuchung ermittelt wurden, für ein anderes Abschnittskollektiv die gleichen Volumengenauigkeiten erreicht werden können. Da eine Abhängigkeit der Stammform vom Standort und von der Bestandesbehandlung gegeben ist, können möglicherweise standortsspezifische Zusammenhänge abgeleitet und für eine genauere Volumenschätzung genutzt werden.

Bei der Bewertung der Genauigkeiten, mit denen Stirnflächen und Abschnittsvolumina in den Vergleichsverfahren ermittelt wurden, bleibt folgendes anzumerken: Aus der für diese Arbeit ausgewerteten Literatur geht hervor, dass sich für ovale Stirnflächen bei einer Flächenberechnung über die Kreisformel anhand von Durchmessern, die aus Kluppungen ermittelt wurden, ein positiver Flächenfehler ergibt (MATERN, 1958 UND SMALTSCHINSKI, 1986). Da auch in der Werkeingangsvermessung die Querschnittsfläche anhand von Durchmessern ermittelt wird, muss dieser Flächenfehler in der Tendenz auch für dieses Vermessungsverfahren unterstellt werden. Das bedeutet, dass die Genauigkeit der foto-optischen Vermessung anhand eines Referenzmaßes überprüft wird, das selbst einen systematischen Flächenfehler (Flächenüberschätzung bei ovalen Stammquerschnittsflächen) beinhaltet, der dann das Volumen entsprechend beeinflusst.

Verfahrensmodifikationen und Softwareentwicklungen

Folgende Verfahrensgrundsätze sind bei der Weiterentwicklung der zweidimensionalen foto-optischen Stirnflächenaufnahme für einen zukünftigen Praxiseinsatz zu berücksichtigen: Eine Polterquerschnittsfläche von $7 \text{ m}^2 - 8 \text{ m}^2$, eine einheitliche oder zumindest bekannte Polterrichtung der Abschnitte, einen festen Polteruntergrund oder Polterunterlagen, eine bekannte Aufnahmeentfernung, ein senkrechtes Anvisieren der Bildebene (Abschnittsstirnflächen) bezüglich des Vertikal- und Horizontalwinkels und eine Maßstabspositionierung in der zu vermessenden Bildebene.

Der Maßstab sollte erstens direkt am aufzunehmenden Objekt (Abschnittsstirnflächen) anliegen, um auszuschließen, dass Maßstabsebene und aufzunehmende Bildebene wesentlich voneinander abweichen und zweitens dabei eine größtmögliche Bildstrecke einnehmen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Abschnittsstirnflächen weiterhin einsehbar bleiben müssen. Dies kann z.B. durch eine diagonal im Bild liegende, durchsichtige, nicht reflektierende Maßstabslatte mit farbig markierten Eckpunkten zur Maßstabseinmessung erreicht werden. Bei Einsatz eines solchen Maßstabssystems werden die beschriebenen bildweisen Über- und Unterschätzungen der Stirnflächen aufgrund der Maßstabspositionierung reduziert. Die in geringem Umfang fehlerhafte Flächendarstellung der Stirnflä-

chen in Abhängigkeit von der Differenz ihrer Aufnahmeentfernungen und der zugehörigen Maßstabsentfernung kann durch eine möglichst bündige Lagerung der Abschnitte minimiert werden. Die beschriebene Positionierung des Maßstabs wird zudem durch eine bündige Lagerung der Abschnittsstirnflächen erleichtert.

Neben der Möglichkeit, die Stirnflächen über den beschriebenen Maßstab zu berechnen, können anhand eines Bildfaktors die Bildpixel direkt in reale Strecken- und Flächengrößen umgerechnet werden. Dieser Bildfaktor wird für definierte Aufnahmebedingungen – dazu gehören in erster Linie eine konstante Kamerabrennweite und eine bekannte Aufnahmeentfernung zum Objekt – berechnet. Die im Bild abgebildeten Stirnflächen lassen sich dann ohne weitere Maßstabberechnung direkt über diesen Bildfaktor ermitteln. Dazu ist es einerseits notwendig, Kameras einzusetzen, die eine konstante Brennweitereinstellung erlauben und nicht autofokussieren, andererseits muss die Aufnahmeentfernung, z.B. mit mobilen Laserentfernungsgeräten, genau eingemessen werden. Die neuerdings (2003/2004) angebotenen Digitalspiegelreflexkameras leisten dies und bieten zudem Vorteile hinsichtlich der Abbildungsqualität und -genauigkeit.

Für größere Polter, die mit zwei Bildern aufgenommen werden, kann eine doppelte Delinierung und damit auch eine doppelte Zählung von Abschnitten im Grenzbereich der beiden Bilder mittels Referenzmarke ausgeschlossen werden. Diese auf beiden Fotos sichtbare Referenzmarke muss hierfür lokal georeferenziert werden. Anhand dieser Georeferenzierung kann der Hoch- und Rechtswert jeder Stirnfläche berechnet und durch Koordinatenvergleich eine Doppelzählung der Stirnflächen verhindert werden.

Für eine Umsetzung dieses Vermessungsverfahrens in die Praxis ist die weitere Entwicklung der Auswertung in Richtung eines halb- bzw. vollautomatisierten Bildverarbeitungs- und Bildauswertungsverfahrens vorteilhaft. Beide hier erprobten Bildverarbeitungsansätze („Aktive Konturenmodelle“ und Bildanalyseprogramm *Halcon*) lassen erwarten, dass eine Einbeziehung weiterer Merkmale von fehlerhaften Stirnflächen in die Programmroutine zu einer hinreichend genauen automatisierten Delinierung aller Stirnflächen führen kann.

Eine halb- bzw. vollautomatisierte Bildauswertungsroutine erfordert zudem, dass die delinierten Stirnflächen eindeutig als Fuß- oder Zopfstirnflächen angesprochen werden. Dies gelingt entweder durch die beschriebene einheitliche Polterrichtung der Abschnitte im Wald, oder im Rahmen der Bildauswertung direkt im Bild, indem der Anwender für die Ladung/das Polter jenen Bereich der sichtbaren Stirnflächen interaktiv markiert, der entweder nur Fußstirnflächen oder nur Zopfstirnflächen abbildet.

Innerhalb eines halb- bzw. vollautomatisierten Auswertungsverfahrens ist die Umsetzung der beschriebenen Stirnflächenklassifikation und -optimierung auch mittels Programmroutine möglich. Die mathematische Klassifikation der Stirnflächenform weist dabei gegenüber der

visuellen Klassifikation den Vorteil auf, dass die mathematische Klassifikation ohne zusätzlichen Eingriff des Anwenders abläuft. Die dargestellte Klassifikationsvariable lässt sich zudem automatisiert berechnen.

Die Abschnittsvolumina und die Durchmesservertelung der Abschnitte können dann mit den delinierten, klassifizierten und optimierten Stirnflächen als Eingangsgrößen in einer automatisierten Routine berechnet werden.

6 Zusammenfassung

Die traditionelle Dimensionsermittlung von Rundholzabschnitten durch einfache Handmessverfahren im Wald ist fehleranfällig, zeit- und kostenaufwendig. Im letzten Jahrzehnt hat sich deshalb die Vermessung von Sägeholzmassensortimenten (schwache bis mittelstarke Nadelrundholzabschnitte in Standardlängen) zunehmend vom Bestand zur Holzindustrie verlagert und wird dort durch eine opto-elektronische Werkeingangsvermessung ergänzt bzw. ersetzt. Zur Kontrolle werden jedoch weiterhin von der Forstseite vor der Abfuhr des Holzes in das Werk die Stückzahl und stichprobenartig die Durchmesser- und Verteilung der Rundholzabschnitte erfasst, um gegenüber der beim Käufer durchgeführten Werkeingangsvermessung über ein Kontrollmaß für die bereitgestellten Holz-mengen zu verfügen. Auch diese Datenerfassung per Hand ist kostenintensiv und wenig genau. Abweichungen zwischen dem forstseitigen und dem werksseitigen erhobenen Maß ergeben sich dabei nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Vermessungsverfahren sondern auch durch Vermischungen, Verwechslungen oder unvollständige Abfuhr von bereitgestellten Holz-mengen. Sie belasten nicht zuletzt aufgrund ihrer Erlösrelevanz die Geschäftsbeziehungen zwischen holzanbietender und -nachfragender Seite. Zusätzlich besteht für die verschiedenen Akteure innerhalb der „Bereitstellungskette Holz“ (Forstbetrieb, Einschlagsunternehmer, Transporteur, Händler) die Notwendigkeit, sich für Dispositionszwecke rasch vor Ort einen hinreichend genauen Überblick über die anfallenden Holz-mengen zu verschaffen und diese zu dokumentieren.

Ziel dieser Untersuchung ist es, ein Vermessungsverfahren auf Basis optischer, bildgebender Technologien in Verbindung mit computergestützten Auswertungsverfahren zu entwickeln. Das Verfahren sollte möglichst mobil einsetzbar sein, und sich als walddnahe Kontrollmaß und als Instrument für Dispositionszwecke eignen. Die Anforderungen an ein derartiges Mess- und Dokumentationsverfahren bestehen in der rationellen, hinreichend genauen und reproduzierbaren Ermittlung der Stückzahl, der Durchmesser- und Verteilung und der Volumina von Nadelrundholzabschnitten, die in Poltern am Bestandesrand und als Transporteinheiten auf dem Lkw gelagert sind. Zusätzlich werden die Voraussetzungen (Verfahrensmodifikationen und Softwareentwicklungen) für die Umsetzung des Verfahrens in die Praxis beschrieben.

In *Vorversuchen* wurde geprüft, ob die eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten genaue, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Dabei wurden digitale Kameras unterschiedlicher Auflösung getestet, die angefertigten Aufnahmen einer Bildvorverarbeitung unterzogen und die Auswirkungen auf die Bildmessungen überprüft. Zusätzlich wurde

die Genauigkeit des Aufnahme- und Auswertungsverfahrens getestet. Dazu wurden Normkörper (Schilder bekannter Größe) unter definierten Aufnahmebedingungen fotografiert und die Normkörperflächen mit einem manuellen Bildauswertungsverfahren berechnet. Die „realen“ Flächen zeigten dabei gegenüber den foto-optisch ermittelten Flächen eine maximale Abweichung von nur 0,9 %. Zudem wurden in einem dreidimensional foto-optischen Verfahren Abschnittsstirnflächen in unterschiedlichen Aufnahmeentfernungen stereophotogrammetrisch aufgenommen, um den Einfluss der Lage der Stirnflächen auf das Vermessungsergebnis der Stirnflächen zu testen.

In umfangreichen *Praxisversuchen* wurden Fichten-Rundholzabschnitte der Abschnittslänge fünf und sechs Meter, die in Poltern an der Waldstraße gelagert waren, in einem Aufnahmeabstand von 10 m mit einer Digitalkamera fotografiert. Weiterhin wurden dieselben Abschnitte auf Transport-Lkws verladen und als Ladungen auf den Transport-Lkws fotografiert. Die Polter und Lkw-Ladungen enthielten insgesamt 1138 Fichten-Rundholzabschnitte, an denen mindestens eine der beiden sichtbaren Stirnflächen erfasst wurde. Vor der Bildnahme wurden an dem Polter an der Waldstraße und an der Transporteinheit auf dem Lkw Maßstäbe positioniert. Aus den angefertigten Fotos wurde die Anzahl der Abschnitte gezählt und die einzelnen Abschnittsstirnflächen mit einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten manuellen Bildauswertungsroutine computergestützt berechnet. Im Hinblick auf eine Umsetzung des Vermessungsverfahrens in die Praxis wurden neben diesem manuellen Bildauswertungsverfahren auch Ansätze für ein halb- und vollautomatisiertes Bildverarbeitungsverfahren zur Erfassung der Abschnittsstirnflächen entwickelt.

Für eine vergleichende Kontrolle der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen wurden dieselben Stirnflächen außerdem dreidimensional foto-optisch (stereophotogrammetrisch) aufgenommen. Dieses Aufnahmeverfahren erlaubte eine foto-optische Stirnflächenvermessung unabhängig von einer vor- und zurückversetzten Lage der Abschnitte im Polter. Zudem wurden die fotografierten Abschnitte innerhalb der Holzbereitstellungskette manuell (Kluppe), mechanisch-hydraulisch (Harvester (HV)) und opto-elektronisch (Werkeingangsvermessung (WEV)) vermessen, um die foto-optisch ermittelten Dimensionsmaße mit den Maßen (Stirnflächen, Volumina) der forstlichen Praxis vergleichen und die Genauigkeit prüfen zu können.

Da die foto-optische Erfassung der Ladungen/Polter sich auf die sichtbaren Abschnittsstirnflächen beschränkte, zur Volumenermittlung und Stärkeklassensortierung jedoch die Mittendurchmesser der Abschnitte als Eingangsgrößen benötigt werden, wurden die Zusammenhänge zwischen foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den zugehörigen Volumina auf statistischem Wege berechnet. Dazu wurden zunächst die im Rahmen der opto-elektronischen Werkeingangsvermessung (WEV) ermittelten Volumina der fotografierten

Abschnitte herangezogen. Über die statistischen Zusammenhänge zwischen Abschnittsstirnflächen und den in der Werkeingangsvermessung ermittelten Abschnittsvolumina konnten so auf Basis der Abschnittsstirnflächen Schätzfunktionen (Regressionsgeraden) der foto-optischen Abschnittsvolumina berechnet werden. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die Abschnitte entlang ihrer Stammlängsachse unterschiedliche Querschnittsformen aufwiesen. Deshalb wurden die Abschnittsstirnflächen nach ihren Formen visuell in die Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ eingeteilt. Weiter wurde untersucht, ob sich mit Clusterverfahren auf mathematischem Wege Stirnflächenvariablen herleiten ließen, mit denen das Ergebnis dieser durchgeführten visuellen Klassifikation bestätigt werden konnte. Für eine genauere Schätzung der Abschnittsvolumina anhand der Abschnittsstirnflächen wurden zusätzlich getrennt für die Stirnflächenformklassen geometrisch konstruierte Stirnflächen gesucht, die die zu den Stirnflächen zugehörigen Abschnittsvolumina genauer schätzten als die foto-optisch ermittelten Stirnflächen. Dieser Vorgang wurde als Stirnflächenoptimierung bezeichnet.

Die Auswertung der Bilder erbrachte folgende Ergebnisse:

Mit der Kamera und den Maßstäben, die in dieser Untersuchung eingesetzt wurden, konnten unter den gewählten Aufnahmebedingungen Bilder angefertigt werden, die den Anforderungen der Bildauswertung hinsichtlich Bildqualität, Format und Detailgenauigkeit genügten.

Die in den Poltern im Bezug zum Maßstab vorgefundene vor- und zurückversetzte Lage der Abschnitte hatte, wie mit dem vergleichenden stereo-photogrammetrischen Verfahren gezeigt werden konnte, kaum Auswirkungen auf die Darstellung der Abschnittsstirnflächen. Der erhöhte Aufwand einer stereo-photogrammetrischen Vermessung ist also für Praxiseinsätze nicht notwendig.

Stirnflächenunterschiede zwischen den foto-optisch ermittelten Stirnflächen und den Stirnflächen der Vergleichsmaße ergaben sich jedoch aufgrund der Maßstabspositionierung im Bild. Die Abschnitte sollten daher möglichst in einer Ebene bündig gepoltet bzw. verladen werden, und die Maßstäbe sollten in der Bildebene angebracht sein.

Die durchgeführte visuelle Klassifikation der Stirnflächenform in die Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ konnte anhand einer mathematisch hergeleiteten Stirnflächenvariablen tendenziell bestätigt werden. Mittels der Formklassifikation der Stirnflächen wurde gezeigt, dass die Flächenunterschiede, die sich beim Vergleich der foto-optisch ermittelten Stirnflächen mit den aus den Vergleichsmaßen berechneten Stirnflächen ergaben, auch auf die Form der Stirnflächen zurückzuführen waren. Es ergaben sich für die Stirnflächen der drei Formklassen unterschiedliche Volumenfunktionen mit unterschiedlichen statistischen Zusammenhängen zu den zugehörigen Stirnflächen der Vergleichsmaße. Je

regelmäßiger die Stirnflächenform, desto straffer ist der statistische Zusammenhang und desto besser ist die Volumenschätzung.

Der Versuch, aus den foto-optischen Stirnflächen geometrisch konstruierte Stirnflächen herzuleiten, die einen stärkeren statistischen Zusammenhang zu den in der Werkeingangsvermessung ermittelten Abschnittsvolumina zeigten, war nur für die Teilkollektive der „unrunden“ Stirnflächen und der „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ zielführend.

Hinsichtlich der Stückzahl, der Durchmesser- und der Abschnittsvolumina ergaben sich für das foto-optische Verfahren folgende Messgenauigkeiten:

Für die Holz-Ladungen auf dem Lkw konnte anhand der angefertigten Bilder die Stückzahl der Abschnitte immer exakt ermittelt werden. Für die Aufnahmen der Holzpolter an der Waldstraße war dies immer dann möglich, wenn die Abschnitte auf festem Untergrund oder mit Hilfe von Polterunterlagen gelagert und ihre Stirnflächen daher vollständig einsehbar waren.

Zur Beurteilung der Volumengenauigkeit des foto-optischen Verfahrens wurden die Volumina der einzelnen Abschnitte, die mit einem Bild aufgenommen wurden, zu einem Abschnittsvolumen pro Bild aufsummiert. Im Vergleich zu dem aus der Werkeingangsvermessung durch Aufsummieren ermittelten Abschnittsvolumen ergaben sich je Bild Volumenunterschiede von bis zu -5,8 % und bis zu +5,6 % in 95 % der Fälle. Damit lagen die Volumenabweichungen geringfügig über den Genauigkeitsanforderungen ($\pm 5\%$), die heute in der Praxis für Stichprobenverfahren im Wald gefordert werden.

Aus den foto-optischen Abbildungen der Stirnflächen ließen sich über die Volumina auch die zugehörigen Mittendurchmesser errechnen. Ihre Verteilung stimmt mit der Durchmesser- und Stärkeklassenverteilung der Abschnitte, die in der Werkeingangsvermessung ermittelt wurden, weitgehend überein: Bedingt durch die Klassengrenzen gab es allerdings Unterschiede zwischen der Anzahl der Abschnitte, die den einzelnen Durchmesser- und Stärkeklassen (1b bis 2b) zugeordnet wurden. Für alle Abschnitte zusammengenommen ergab sich nach foto-optischer Ermittlung gegenüber der Werkeingangsvermessung ein mittlerer Durchmesserunterschied von -0,6 cm (bei 19,3 cm und 19,9 cm).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass das entwickelte foto-optische Vermessungsverfahren grundsätzlich den Forderungen eines waldnahen Kontrollmaßes entspricht und zu Dispositionszwecken von Forst- und Holzwirtschaft eingesetzt werden kann. Voraussetzung für die Einführung dieses foto-optischen Vermessungsverfahrens in die Praxis als rationelles, schnelles und genaues Vermessungs- und Dokumentationsverfahren sind jedoch bestimmte Verfahrensmodifikationen und -weiterentwicklungen bezüglich der Hardwarekomponenten und der automatisierten Bildverarbeitungsroutinen: Zu den erfolgsversprechenden Modifikationen bei den Hardwarekomponenten zählt dabei der Einsatz von

Digitalspiegelreflexkameras in Verbindung mit lasergestützten Einmessungen der Aufnahmeentfernungen von Poltern. Das Aufnahmeverfahren wird durch den Einsatz dieser Komponenten erheblich vereinfacht und ermöglicht eine höhere Messgenauigkeit, da die Aufnahmebedingungen exakter definiert werden können bzw. zwischen den einzelnen Aufnahmen weniger variieren. Dies hat zudem den Vorteil, dass durch standardisierte Softwarevoreinstellungen auch der Automatisierungsgrad der Bildverarbeitungs- und Bildauswertungsroutinen steigt und somit der Anwender entlastet wird.

7 Summary

During the last ten years the measurement of sawlog assortments (small to medium sized softwood logs of standard length) has shifted from the roadside to the mill gate of the wood processing industry. Determining the dimensions of the round wood by means of traditional, simple manual measurement procedures in the forest is prone to errors and costly. Thus, opto-electronic measurements on arrival at the sawmill increasingly support or replace these traditional measurement procedures. However, quantity determinations and random surveys of diameter distribution of the round wood made available to the sawmill are carried out by the forest owners in order to be able to check the results of the round wood measuring unit (WEV) carried out by the buyer. This manual data collection is cost-intensive and inaccurate. Furthermore differences between the volume calculated by saw mills' and the volume assessed by forest owners are frequently due to the different methods of measurement as well as mixing and/or incomplete collection of the supplied quantity of timber. These irregularities tend to disturb the business relations between wood-supplying and wood-demanding industry. Furthermore, a means for a quick and representative in-situ overview of the wood quantities ready to deliver is needed for purposes of logistics and disposition by several partners involved in the forest- and wood-industry chain (e.g. forest enterprises, harvest contractors, haulage contractors, traders).

The aim of this survey is the development of a quick, cheap, reliable and mobile measurement procedure that is based on optic and digital technologies in connection with computer based image analysis which is accepted by both sides, forest and wood industry, as a practicable means for measurement and dispositional purposes. This measurement and documentation procedure is required to be able to determine the quantity, diameter distribution and volumes of the softwood logs stored in stacks in the forest at the roadside or as transport units on trucks.

Thus, given hard- and software components are tested concerning their practicability to create an image-based measurement procedure for determination of the above stack measures that is practicable as well as able to fulfil the requirements that have to be met when carrying out random samples for measurement investigations in the forest ($\pm 5\%$ deviation in 95% of all).

In preliminary experiments it has been examined whether the selected hard- and software components are able to produce accurate, reliable and repeatable results. Therefore, digital cameras with different resolutions were tested, an initial digital image processing was undertaken on the digital photographs and the resulting effects for the measurements on the

images were checked. Furthermore, the accuracy of the recording and analysis procedure was tested. Hence, standardized components (shields of given size) were photographed under defined conditions and the standardized components' areas were calculated by means of manual image evaluation. As a result, the photo-optically measured areas deviated from the 'real' areas with a maximum of only 0.9 %. In addition, the logs' top and bottom cross sections were stereo-photogrammetrically photographed in a three-dimensional photo-optic procedure in order to test to what extent the measurement of the cross sections are independent of the distance.

In extensive practical experiments spruce log stacks of five- and six-metre log length stored at the forest road were photographed with a digital camera from a distance of 10 metres. In addition, these logs were loaded on trucks and the load was photographed again as transport units on the trucks. The stacks and loads consisted of a total of 1138 spruce logs of which at least one of the two cross sections was photographed. Before taking the pictures, scales were attached to the stacks at the forest road and the transport units on each truck. The number of the logs was manually counted on the photographs and the areas of the individual cross sections were calculated by a computer-based manual picture evaluation routine developed in this survey. Aiming at a procedure that can be put into practice, approaches for the development of semi- and fully automatic image processing procedures for determination of the log cross section areas were made in addition to this manual image evaluation routine. In order to compare and to check on the two-dimensionally photo-optically determined cross section areas, the same cross sections were photographed in a three-dimensional (stereo-photogrammetric) procedure. This method allowed photo-optic cross section measurements independent of the logs' uneven position in the stack. Furthermore, the photographed logs were measured manually (calliper), mechanio-hydraulically (harvester (HV)), and opto-electronically (WEV). Thereby, a comparison of the photo-optically determined dimension measures (cross section areas, volumes) to the measures of the forest practise and an examination of the accuracy was feasible.

As the photo-optical determination of transport units/stacks was limited to visible log cross section areas of the stacks/transport units and as, however, determination of volumes and dimension class grading requires knowledge of the log length and mid diameter, the relations between photo-optically determined cross section areas and the corresponding volumes were calculated statistically. In a first step, the volumes of the photographed logs determined through the opto-electronic WEV were examined. The statistic relations between log cross section areas and WEV log volumes enabled, on the basis of the log section areas, a calcu-

lation of estimation functions (linear regressions) for the photo-optical log volumes. Thereby, the change of the cross-section shape along the logs' longitudinal axis had to be taken into consideration. Therefore, the cross sections were visually classified into 'round', 'un-round', and 'cross sections with buttresses' according to their shape. Additionally, the mathematical derivation of cross section area variables via cluster methods was examined which could furthermore proof the results obtained by the visual classifications. In order to achieve a more accurate estimation of the log volumes in relation to the log cross section areas, geometrically constructed cross sections for the relevant cross-section shape classes were determined, which would allow a more accurate estimation of the log volumes than the photo-optically determined cross section areas. This process was called cross section area optimization.

The complex image evaluation procedures lead to the following results:

With the camera and scales used for this examination and under the chosen conditions, images were produced suitable for image evaluation according to picture quality, format and detail accuracy.

The comparative stereo-photogrammetrical procedure showed that the uneven distribution of the logs in the stack did not influence the depiction on the log section areas. Therefore, a complicated 3-D-image procedure was not needed to be used in practice.

Deviations between the photo-optically determined cross section areas and the cross section areas of the comparative measures occurred due to the positioning of scale in the picture. Thus, the logs need to be stacked or loaded as even as possible and the scales must be positioned according to this picture level.

The established cross-section shape classifications 'round', 'un-round', and 'cross sections with buttresses' were mainly confirmed through mathematically derived cross section variables. Furthermore, these shape classifications showed that the derivations between the photo-optically determined cross section areas and the cross section areas of the comparative measures' calculation were also due to the shape of the cross sections. The three shape classifications lead to different volume functions depending on different statistical relations of each shape classes cross section areas to the corresponding comparative cross section areas. The more regular the cross sections are shaped, the better the statistical relation was found, which thereby allowed more accurate volume estimations.

Derivation of geometrically constructed cross section areas from the photo-optical cross section areas showing a closer statistical relation to the WEV-determined log volumes, was achieved only for the 'un-round' and 'cross sections with buttresses' classes.

Concerning quantity, diameter distribution and volumes of the logs, the following measurement accuracies arose from the photo-optical procedure:

On the photographs of the stacks, the log quantity of the transport units was always accurately determinable. Concerning the photographs taken from stacks at the forest road, this was only possible if the logs were stored on solid ground or on stack mats and if thereby all cross sections were completely visible.

Evaluating the volume accuracy of the photo-optical procedure, the volumes of the logs photographed in one picture were added up to one total log volume per picture. In comparison to the respective WEV log volume sums, the determined picture log volume sums deviated with a maximum of -5.8 % to +5.6 % per picture in 95 % of all. Thus, the volume deviation slightly exceeded the accuracy requirements prescribed for today random volume assessment in the forest.

Furthermore, the photo-optically determined volumes enabled calculation the log mid-diameters. These log mid-diameters were smaller than the WEV determined log diameters with an average of -0.6 cm (19,3 cm and 19,9 cm). The distribution of the photo-optically determined diameter quantities was mainly equal to the WEV distribution. Due to the classification limits, the log quantities' distribution of the according diameter and dimension classes (1b to 2b) differed to a certain degree.

The results of this survey show that the photo-optical developed measurement procedure in this thesis can be used as a practicable means for volume measurements with acceptable accuracy in the forest. Preconditions for the realisation of this photo-optical measurement procedure as a suitable, i.e. rational, quick and accurate measurement and documentation procedure, however, are the following procedure modifications and further development of the hardware components and automated image processing routines. Promising modifications concerning the hardware components are the usage of digital mirror reflex cameras in connection with laser supported measurement of the stack-photographing distance. This modified component considerably simplifies the recording procedure and increases the measurement accuracy, as the recording conditions are defined more carefully or differ less between single photographs. Furthermore, this has the advantage that the standardised software pre-settings allow a higher degree of automated image processing and evaluation routines and thereby simplify the application for the user.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	In den Feldversuchen aufgenommene Variablen _____	61
Tabelle 2:	Deskriptive Statistik und t-Test für Normkörper, die mittels Coolpix 990 und 5700 aufgenommen wurden _____	65
Tabelle 3:	Statistische Kennwerte der Stirnflächen [cm ²] verzeichneter (Original-) Bilder und der zeichnungsfrei gerechneten Bilder im Vergleich und prozentuales Verhältnis der verzeichneten zu den zeichnungsfreien Stirnflächen [%] _____	67
Tabelle 4:	Deskriptive Statistik und t-Test der foto-optischen Normkörperflächen, die mit den Auswertungsroutinen in „Adobe Photoshop + Scion Image“ (Routine 1) und ArcView GIS 3.2 (Routine 2) ermittelt wurden. _____	68
Tabelle 5:	Variationskoeffizient und das Verhältnis Spannweite zur mittleren Stirnfläche [%]. _____	69
Tabelle 6:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [cm ²] _____	73
Tabelle 7:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen der Werkeingangsvermessung (WEV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	74
Tabelle 8:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [cm ²] _____	75
Tabelle 9:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen der Harvestervermessung (HV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	75
Tabelle 10:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Stirnflächen des zweidimensionalen und dreidimensionalen foto-optischen Verfahrens [cm ²] _____	76
Tabelle 11:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der aufsummierten Stirnflächen des dreidimensionalen foto-optischen Verfahrens (DFV) und der aufsummierten Stirnflächen des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	76
Tabelle 12:	Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für das zweidimensionale foto-optische Verfahren (ZFV), das dreidimensionale foto-optische Verfahren (DFV), die Harvestervermessung (HV) und die Werkeingangsvermessung (WEV) _____	77
Tabelle 13:	Prozentuale Abweichung der zweidimensionalen foto-optisch ermittelten Stirnflächen mit den „realen“ Stirnflächen, die über eine Radienmessung ermittelt wurden, für bündig und unbündig gelagerte Abschnitte _____	81
Tabelle 14:	Mittelwerte der logarithmierten Fehlervarianzen (log s ² res) für die visuellen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ für die Aufnahmeorte Waldstraße und Werkseingang _____	87

Tabelle 15:	Clusterzentren der logarithmierten Fehlervarianzen der Stirnflächen für die Aufnahmeorte Waldstraße und Werkseingang _____	88
Tabelle 16:	Stirnflächentypen (Abschnittsfuß), die den höchsten Korrelationskoeffizienten zum Werkeingangsvolumen (WEV) aufweisen – getrennt nach Art der Klassifikation, Formklassen und Abschnittslängen _____	90
Tabelle 17:	Deskriptive Statistik und t-Test für die „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [m ³] (Gesamtkollektiv - Ebene 1) _____	94
Tabelle 18:	Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Werkeingangsvermessung (WEV) [m ³] (Gesamtkollektiv - Ebene 1) _____	95
Tabelle 19:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] (Ebene 2) _____	95
Tabelle 20:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Volumendifferenz zwischen der WEV und der ZFV („optimiert“ und „nicht-optimiert“) bezogen auf den Einzelabschnitt [m ³] (Ebene 3) _____	96
Tabelle 21:	Deskriptive Statistik für das Verhältnis der Volumina zwischen der WEV und der „optimierten“ ZFV bezogen auf den Einzelabschnitt [%] für 95 % der Fälle (Ebene 3) _____	97
Tabelle 22:	Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [m ³] (Ebene 1) _____	97
Tabelle 23:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvestervermessung (HV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] (Ebene 2) _____	98
Tabelle 24:	Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens und der HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung [m ³] (Ebene 1) _____	99
Tabelle 25:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] (Ebene 2) _____	99
Tabelle 26:	Deskriptive Statistik für die einzelabschnittsweise Volumendifferenz zwischen der HKS-konform ermittelten WEV und der HKS-konform ermittelten ZFVopt bezogen auf den Einzelabschnitt [m ³] (Ebene 3) _____	100
Tabelle 27:	Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Einzelabschnittsvolumina, die HKS-konform in der WEV und im HKS-konformen „optimierten“ ZFV ermittelt wurden [%] für 95 % der Fälle (Ebene 3) _____	100

Tabelle 28:	Deskriptive Statistik und t-Test für die „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Kluppung (KL) [m ³] (Ebene 1)	101
Tabelle 29:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung (KL) und der „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] (Ebene 2)	101
Tabelle 30:	Kalibrierungswerte der Nikon Coolpix 990	149
Tabelle 31:	Kalibrierungswerte der Seagull 6x6	149
Tabelle 32:	Einfaktorielle Varianzanalyse der Variablen log s ² res zwischen den Formklassen „rund“, „unrund“, „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ mit Scheffé-Prozedur (der visuellen Klassifikation)	156
Tabelle 33:	Clusterzentrenanalyse mit drei Clusterzentren und 14 Iterationsschritten	157
Tabelle 34:	Einfaktorielle Varianzanalyse der Variablen log s ² res zwischen den Formklassen „rund“, „unrund“, „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ mit Scheffé-Prozedur (mathematischer Klassifikation)	159
Tabelle 35:	Korrelationskoeffizienten r nach Pearson zwischen den Stirnflächen der ZFV und der WEV für die visuellen und mathematischen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“	160
Tabelle 36:	Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den Zusammenhang zwischen zweidimensional foto-optischer Stirnfläche und Werkeingangsvolumen – getrennt nach visuellen Formklassen, Abschnittslänge und Fuß- und Zopfseite	160
Tabelle 37:	Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den Zusammenhang zwischen zweidimensional foto-optischer Stirnfläche und Werkeingangsvolumen – getrennt nach mathematischen Formklassen, Abschnittslänge und Fuß- und Zopfseite	160
Tabelle 38:	Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den jeweils stärksten Zusammenhang zwischen Stirnflächentypen des ZFV an Abschnittfuß- und -zopfseiten und Werkeingangsvolumen (WEV) – getrennt nach Art der Klassifikation, Formklassen und Abschnittslängen	161
Tabelle 39:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise summierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]	161
Tabelle 40:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³]	161
Tabelle 41:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]	162

Tabelle 42:	Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Volumina der WEV und der „optimierten“ ZFV – bezogen auf den Einzelabschnitt [%] – für 100 % der Fälle _____	162
Tabelle 43:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Abschnittsvolumina des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [m ³] _____	162
Tabelle 44:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvestervermessung (HV) und des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] ____	162
Tabelle 45:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvestervermessung (HV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	163
Tabelle 46:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvestervermessung (HV) und der „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	163
Tabelle 47:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	163
Tabelle 48:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] _____	164
Tabelle 49:	Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Volumina der HKS-konform ermittelten WEV und der HKS-konform ermittelten „optimierten“ ZFV – bezogen auf den Einzelabschnitt – [%] für 100 der Fälle _____	164
Tabelle 50:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	164
Tabelle 51:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung (KL) und den aufsummierten „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	164
Tabelle 52:	Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung und der aufsummierten „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m ³] _____	165

Tabelle 53:	Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung und den aufsummierten „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%] _____	165
Tabelle 54:	Beobachtete Abschnittszahl je Durchmesserklasse für aus der WEV ermittelten Mittendurchmesser im Vergleich zur erwarteten Abschnittszahl (hier: mittlerer Durchmesser aus der ZFV) _____	165
Tabelle 55:	Chi-Quadrat-Test für die Variable WEV-Mittendurchmesser _____	166
Tabelle 56:	Deskriptive Statistik für die Differenz der mittleren Durchmesser des ZFV und den Mittendurchmessern der WEV [m] _____	166

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zentralperspektive/ Abweichungen von der Zentralperspektive / Innere Orientierung (aus LUHMANN, 2000) _____	27
Abbildung 2: Passpunktsystem um die Lkw-Holzladungen _____	28
Abbildung 3: Maßstab/Passpunktsystem/Reflektormarke _____	29
Abbildung 4: links: Fotonahme der Rückseite des hinteren Holzstoßes des Lkws; rechts: Fotonahme der Vorderseite des hinteren Holzstoßes nach Entladung des vorderen Holzstoßes _____	31
Abbildung 5: Betrachtung eines Holzpolters unter dem Winkel α (verändert nach MEYER, 1995) _____	32
Abbildung 6: Nummerierte und markierte Abschnittsstinrflächen mit Maßstab _____	35
Abbildung 7: Ermittlung der Polygongröße in <i>ArcView GIS 3.2</i> _____	37
Abbildung 8: links: manuell delinierte Stirnfläche mit Tangentialriss; rechts: dieselbe mit Hilfe der „snake“-Funktion automatisiert delinierte Stirnfläche (Tangentialriss wird eingeschlossen) _____	41
Abbildung 9: RGB-Bild der Stirnflächen, das in das Bildanalysepaket <i>Halcon 6.1</i> eingelezen wurde _____	42
Abbildung 10: Transformiertes Graubild _____	42
Abbildung 11: Bild nach Einsatz eines Glättungsfilters _____	43
Abbildung 12: Invertiertes Grauwertbild _____	43
Abbildung 13: Wasserscheidentransformation; rote Linien stellen Wasserscheiden dar _____	43
Abbildung 14: Ergebnis einer mehrfachen Schwellwertoperation innerhalb eines jeden Beckens _____	44
Abbildung 15: Ausgabe der delinierten Stirnflächen _____	45
Abbildung 16: Stereonormalfall (LUHMANN, 2000) _____	47
Abbildung 17: Frontalansicht (links) und seitliche Ansicht (rechts) von Stirnflächen einer Lkw-Holzladung in der CAD Software <i>MicroStation</i> . Die nicht-bündige Polterung ist erkennbar. _____	49
Abbildung 18: Darstellung der Abschnittsstinrflächen in Abhängigkeit von ihrer Aufnahmeentfernung _____	50
Abbildung 19: runde Stirnfläche _____	51
Abbildung 20: unrunde Stirnfläche _____	51
Abbildung 21: Stirnfläche mit Wurzelanlauf _____	52
Abbildung 22: Stirnfläche mit minimalem, mittlerem und maximalem Durchmesser _____	54
Abbildung 23: links: aus vier Ellipsenbögen konstruierter Polygonzug mit umschließenden Rechteck; rechts: Vergleich dieser konstruierten Polygonzüge mit den manuellen markierten Stirnflächen _____	55
Abbildung 24: Versuchsaufbau der vor- und zurückversetzten Normkörper _____	58

Abbildung 25: links: bündige Lagerung der Abschnitte; rechts: zurück- und vorversetzte Lagerung der Abschnitte _____	59
Abbildung 26: Prozentuale Abweichung der mit der Coolpix 990 aufgenommenen Flächen im Verhältnis zu den mit der Coolpix 5700 (100 %) aufgenommenen Flächen [%] _____	66
Abbildung 27: Stirnflächen, die mit einer „snake-Funktion“ halbautomatisch (d.h. nach Anklicken der Stirnflächen) deliniert wurden. Gelbe Markierungen zeigen eine unzureichende Delinierung an „problematischen“ Stirnflächen; rote Markierungen zeigen eine zufrieden stellende Delinierung _____	71
Abbildung 28: Delinierte Stirnflächen mittels Auswertungsroutine in <i>Halcon 6.1</i> _____	72
Abbildung 29: Foto-optisch ermittelte Normkörperflächen in Abhängigkeit der Kamera-Objekt-Entfernung _____	80
Abbildung 30: Vergleich der im zweidimensionalen foto-optischen Verfahren ermittelten Stirnflächen mit den „realen“ Stirnflächen bei bündiger bzw. unbündiger Lagerung der Abschnitte _____	82
Abbildung 31: Prozentuale Abweichung der zweidimensional foto-optisch ermittelten Stirnflächen von den „realen“ Stirnflächen der Radienvermessung in Abhängigkeit der Abschnittsentfernung zum Maßstab in 10 m bzw. der Aufnahmeentfernung der Abschnitte _____	83
Abbildung 32: Zuordnung der Abschnitte zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV _____	107
Abbildung 33: Zuordnung der Abschnitte zu den Stärkeklassen nach WEV und ZFV _____	108
Abbildung 34: Auswirkung der radial-symmetrischen Verzeichnung (aus LUHMANN, 2000) _____	148
Abbildung 35: Abbildungsgröße von Objekten mit unterschiedlicher Aufnahmeentfernung in einer Kamera _____	150
Abbildung 36: Darstellung einer Stirnflächenkontur als komplexe Funktion der Bogenlänge t nach BURKHARDT (2002) _____	151
Abbildung 37: Stirnflächenkontur (Polygonzug) _____	153
Abbildung 38: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=2$ _____	153
Abbildung 39: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=3$ _____	153
Abbildung 40: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=4$ _____	153
Abbildung 41: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=7$ _____	153
Abbildung 42: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=9$ _____	153
Abbildung 43: Prozentuale, mittlere Abweichung der aufsummierten Stirnflächen der Werkeingangsvermessung (WEV), der Harvestervermessung (HV) und der dreidimensionalen foto-optischen Vermessung (DFV) je Aufnahme zu den aufsummierten Stirnflächen der zweidimensionalen foto-optischen Vermessung getrennt nach den Aufnahmeorten Lkw und Waldstraße _____	155

Abbildung 44: Periodogramm einer Stirnfläche mit Wurzelanlauf (323; links) und einer runden Stirnfläche (267; rechts) mit der beschriebenen 70 % Schwingungsschwelle _____	156
Abbildung 45: Zuordnung der Fichtenabschnitte der Länge 5 m zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV _____	166
Abbildung 46: Zuordnung der Fichtenabschnitte der Länge 6 m zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV _____	167
Abbildung 47: Streudiagramm der in der WEV ermittelten Abschnittsvolumina über den foto-optisch ermittelten Stirnflächen für das Teilkollektiv „Länge 5m – Zopfstirnfläche - rund“ (n=104) _____	167

10 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratcentimeter
DFV	Dreidimensional foto-optisches Verfahren
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrienorm
DM	Deutsche Mark
€	Euro
etc.	et cetera
Fa.	Firma
FD	Fourierdeskriptor
FK	Fourierkoeffizient
fm	Festmeter
ha	Hektar
HKS	Handelsklassensortierung für Rohholz
HV	Harvestervermessung
Jhg.	Jahrgang
Kap.	Kapitel
KL	Kluppe
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mm	Millimeter
m. R.	mit Rinde
MAX	Maximalwert
MIN	Minimalwert
Mio.	Million
n	Stichprobengröße
Nr.	Nummer
n.s.	nicht signifikant
o. R.	ohne Rinde

Rad.	Radius
RGB	Rot Grün Blau
Rm	Raummeter
s	Standardabweichung
sign.	signifikant
sog.	sogenannt
StanForD	Standard for Forest Data and Communication
t	T-Wert
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
VK	Variationskoeffizient
WA	Wurzelanlauf
WEV	Werkeingangsvermessung
\bar{x}	Mittelwert
z.B.	zum Beispiel
ZFV	zweidimensional foto-optisches Verfahren
°	Grad
%	Prozent

11 Literatur

- ALBERTZ, J. (1999): Methoden der Mustererkennung. In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 17, Fernerkundung und Ökosystemanalyse. Bayerische Akademie der Wissenschaften: 37 - 52
- ALTHERR, E. (1963): Untersuchungen über Schaftform, Berindung und Sortimentsanfall bei der Weißtanne. AFJZ Nr.134: 111 - 122 u. 140 - 151
- ANDERSON, C.; WALTER, F. (1995): Classification of compression wood using digital image analysis. Forest Product Journal Vol. 45, No. 11/12: 87 - 92
- ANDRADE, R. R. (2001): Mensurações dendrométricas com câmeras digitais calibradas. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba: 137 S.
- ANONYMUS (2002): Waldmesslehre. Abteilung für Forstliche Biometrie. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: 123 S.
<http://www.fuw.uni-freiburg.de/biometrie/downloads/waldmesslehre.pdf> (16.01.04)
- ARNOLD, D. (1986): Vorteile digitaler Bildverarbeitung für die Spananalyse. Holz als Roh- und Werkstoff 44: 249 - 252
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft München, Bonn, Wien: 490 S
- BECKER, G. (1997): Holznutzung und Holzbereitstellung im Informationszeitalter – vom Holzweg auf die Datenautobahn. AFZ/Der Wald 3: 128 – 132
- BECKER, G.; RAUPACH, Ch. (1990): Werkeingangsvermessung von Nadelstammholz-Abschnitten. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 340 - 344
- BECKER, G.; RESSMANN, J.; HECKER, M. (1999): Kundenorientierte Holzernte mit Harvestern unter Rheinland-Pfälzischen Bedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: 69 S.
- BECKER, G.; WOBST, J. (1990): Die Werkeingangsvermessung von Derbholzstangen. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 337 - 340.
- BERGMANN, A. (1997): Kundenorientierte Rohholzbereitstellung bei vollmechanisierter Holzernte. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät, Universität Göttingen.
- BERTOLA, A. (2002): Use of digital pictures to quantify the solid volume of stacked wood. Universidade Federal de Vicosa, Minas Gerais, Brasil. Master thesis. 61 S.
- BLAIS, F.; LECAVALIER, M. (1995): Application of the Biris range sensor for volume evaluation. Proceedings of the Optical 3-D Measurement Techniques III, Vienna, Austria. October 2-4 1995: 404 - 413.
- BLASCHKE, T (2000): Objektextraktion und regelbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten: Neue Möglichkeiten für GIS-Anwender und Planer. Vorabversion, erschienen in: Schrenk, M. (Ed.): Corp´2000, www.corp.at (16.01.04)
- BLASCHKE, T. (2001): Multiskalare Bildanalyse zur Umsetzung des Patch-Matrix-Konzepts in der Landschaftsplanung. „Realistische“ Landschaftsprojekte aus Fernerkundungsdaten. Naturschutz und Landschaftsplanung 33 (2/3): 84 – 89

- BORT, U.; MAHLER, G.; PFEIL, Chr. (1989): Vermessung von Fixlängen. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg. Versuchs-Bericht. Abteilung AWF 89/9
- BORT, U.; MAHLER, G.: (1990): Stichprobenvermessung von Profilspaner-Abschnitten. Forst und Holz Nr.8, 45. Jhg.: 198 - 202
- BRUCE, D. (1982): Butt log estimators. Forest Science, Vol. 28, No. 3 : 489 - 503
- BUCHHEIM, W. (1938): Kluppung und Kreisform des Stammquerschnittes. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen (70. Jhg.) Heft 12: 656 - 658
- BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT (1969): Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz vom 31. Juli. Bundesgesetzblatt I, S. 1075.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1982): Empfehlungen zur Rationalisierung der Holzvermessung. Der Forst- und Holzwirt Nr. 2: 35 - 40
- BURKHARDT, H. (1993): Transformation zur lageinvarianten Merkmalgewinnung. 2., unveränderte Aufl. Habilitationsschrift Universität Karlsruhe. Erschienen Oktober 1979 im VDI-Verlag Düsseldorf, VDI-Fortschrittsbericht, Reihe 10, Nr. 7: 92 S.
- BURKHARDT, H. (2002): Grundlagen der Bilderzeugung und Bildanalyse (Mustererkennung). <http://imb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/mustererkennung/WS0304/material.html> (16.01.04)
- BUSCH, A.; PRÄGER, S.; HEIL, K. (1996): Zum Vermessen von Langholzabschnitten – Harvestermaß, Handmaß und Werksmaß im Vergleich - . Forst und Holz 51. Jhg.: 778 - 779
- CARVALHO, F; CORREIA, B. B.; DAVIES, R; RODRIGUES, F. C.; FREITAS, J. C. (1993): Image processing systems for the measurement of timber truck loads. In: Anand K. Asundi; S. T. Tan [Editors]. Proc. SPIE Vol. 1713, p. 86-92, International Conference on Manufacturing Automation.
- CHENG, D.; SCHMIDT-TRUCKSÄSS, A.; CHENG, K.; BURKHARDT, H. (2002): Using snakes to detect the intimal and adventitial layers of the common carotid artery wall in sonographic images. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 67: 27-37
- CORREIA, B. B.; DAVIES, R.; CARVALHO, F.; RODRIGUES, F. C. (1993): A Computer vision system for the automatic measurement of volumes of wood. In: D. W. Braggings [Editors]. Proc. SPIE Vol. 1989, p.206-214, Computer Vision for Industry.
- DEHN, R.; TAUBE, D.; SLOBODA, B. (1985): Schaftvermessung an stehenden Bäumen mit einem eindimensionalen Passpunktsystem. AFZ/Der Wald 15: 350 - 353
- DEMAERSCHALK, J. P.; COTTELL, P. L.; ZOBEIRY, M. (1980): Photographs improve statistical efficiency of truckload scaling. Canadian Journal of Forest Research 10: 269 - 277
- DFWR/VDS (1994): Anforderungskatalog für die Werksvermessung von Stammholz. Gemeinsame Bestimmung der Forstwirtschaft (DFWR) und der Sägeindustrie (VDS) für die Bundesrepublik Deutschland.
- DIEDERSHAGEN, O. (2001): Automatische Erfassung von Sturmflächen in panchromatischen Luftbildern und hochauflösenden multispektralen Satellitenbildern. Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. 96 S.

- DIETZ, H.-U.; HAUCK, B. (1997): Automatisierte Rohholzvermessung durch Kranvollernter – Entwurf eines Pflichtenheftes. KWF: Forsttechnische Informationen, Fachzeitschrift für Waldarbeit und Forsttechnik 3: 21 – 25
- DIN 55350 : http://barolo.ipc.uni-tuebingen.de/pharma/2/2.1/genauigkeit_richtigkeit.html (16.01.04)
- DREEKE, R. (1997): Harvestervermessung und die HKS. AFZ/Der Wald 3: 122 – 124
- EMHARDT, M. (1998): Aktueller Stand der Werksvermessung. AFZ/Der Wald 3: 118 - 120
- EUWID (2003): Investitionszurückhaltung belastet Anbieter von Rundholzplatanlagen. EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, Gernsbach, Nr. 11
- FELLER, S. (1998): Stichprobenverfahren zur Vermessung von Standardlängen- ein Vergleich. <http://www.lwf.uni-muenchen.de/veroef/veroef98/lwfakt11> (20.01.02)
- FINK, F.; BECKER, G.; (2002): Rationalisierung der Holzvermessung auf zentralen Umschlagplätzen. Interner Arbeitsbericht des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: 65 S.
- FISCHER, H. W.; HAPPERSBERGER, G. (1990): Erfahrungen mit der elektronischen Werkeingangsvermessung in Rheinland-Pfalz. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 344 - 347
- GEOINFORMATIK-SERVICE (2002): Geoinformatik Lexikon. Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock. <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=-625599964> (16.01.04)
- GLÄSER, H. (1953): Die photographische Methode zur Festgehaltsermittlung von Schnittholz. Holz-Zentralblatt 47: 545.
- GODDING, R. (2003): Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahmesysteme. <http://www.aicon.de> (23.05.03)
- GRAMMEL, R. (1989): Forstbenutzung. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin: 193 S.
- GRIESINGER, F.-E. (1994): Zur Werksvermessung aus der Sicht des Waldbesitzers. Holz-Zentralblatt 120 Jhg (128): 2121 – 2130
- GRUBDORF, S. (1997a): Genauigkeit verschiedener Rohholzmeßsysteme an Vollerntern. AFZ/Der Wald 3: 119 - 121
- GRUBDORF, S. (1997b): Niedersächsischer Vorschlag für eine Kalibrierungsvorschrift. KWF: Forsttechnische Informationen, Fachzeitschrift für Waldarbeit und Forsttechnik 3: 25 - 28
- GUGLHÖR, W. (1994): Beiträge zur Vermessung von schwachem Nadelstammholz – Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge. Forst und Holz 49. Jhg.: 136 - 138
- GUGLHÖR, W. (1994): Vermessung – ein Dauerbrenner? Kontrollmaß für den Forstunternehmer. Forst & Technik 6: 10 - 13
- GUGLHÖR, W.; FELLER, S.; VALLASTER, K. (1996): Stichproben-Vermessung von schwachem Stammholz in Standardlängen. Holz-Zentralblatt Nr. 51: 826 - 834
- HALCON/ C++ REFERENCE MANUAL (2001). MVTec Software GmbH. Version 6.0.1
- HARTUNG, W.; LORENZ, G. (1984): Messung von Rundholz mit Hilfe von CCD-Zeilen bei der Gestaltung technologischer Prozesse der Rohholzausformung. Holztechnologie 3: 146 – 147

- HASSENSTEIN, V.-C.; HEIL, K. (1996): Zum Vermessen von Langholzabschnitten – Ein Vergleich manuell erhobener Messdaten mit dem Werksmaß. Forst und Holz 51. Jhg.: 682 - 683
- HAUFFE, P.; MÜLLER, L. G. (2002): Rundholzmaß bei der automatischen Vermessung – Wettbewerbsfähigkeit muss auch bei der Rundholzvermessung hergestellt werden (2). Holz-Zentralblatt Nr. 89: 1063
- HECKER, M.; RESSMANN, J.; BECKER, G. (1998): Wertschöpfungspotentiale und ihre Realisierung entlang von Holzernte- und Logistikketten – dargestellt am Beispiel der kundenorientierten Aushaltung mit Vollerntersystemen. Forst und Holz 53 Jhg., Nr. 21: 651 – 655
- HRADETZKY, J. (1981): Spline-Funktionen und ihre Anwendung in der forstlichen Forschung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 100: 45-59
- JÄHNE, B. (2002): Digitale Bildverarbeitung. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer: 618 S.
- JÖRG ELEKTRONIK (2003): <http://www.je-gmbh.de/Deutsch/JeFrameset.htm> (16.01.04)
- KAISER, R.; MAHLER, G.; WURSTER, M. (2000): Neuerungen für die Werksvermessung von Stammholz. Holz-Zentralblatt Nr. 126: 1707
- KÄRKKÄINEN, M. (1975): Summary: Measurement of the cross-sectional area of birch and aspen logs. Silva fennica Vol. 9, No. 3: 232
- KASS M.; WITKIN A.; TERZOPOULOS, D. (1987): Snakes: Active Contour Models. International Journal of Computer Vision Vol. 1: 321-331.
- KENNEL, R. (1959): Die Genauigkeit von Klappung und Umfangmessung nach einem Vergleichsversuch. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Heft 7/8: 243 - 251
- KLEBES, J.; MAHLER, G. (1990): Die Werksvermessung im Praxistest – erste Ergebnisse und Erfahrungen. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 333 - 337
- KLEINN, Ch. (1989): Einzelbaumberechnungen mit dem Programm SITCA. Mitteilungen der Abteilung für Forstliche Biometrie, Universität Freiburg, 12-33
- KOCH, B.; REIDELSTÜRZ, P. (1998): Terrestrische Stereophotogrammetrie für forstliche Anwendungen. AFZ/Der Wald 24: 1464 - 1467
- KONEČNY, G. ; LEHMANN, G. (1984): Photogrammetrie. 4., völlig neu bearbeitete Auflage. Walter de Gruyter Verlag. Berlin und New York 1984: 391 S.
- KORSUN, F. (1934): Die Bestimmung des Festgehaltes von Rundholz. Mitt. d. staatl. forstl. Vers. Anstalt., Sekt. f. forstl. Ökonomie, Brünn. Pisek, 1934 in Prodan, M. (1965) Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.: 644 S.
- KRAFT, D.; VENUS, T. (1998): Anforderungen an eine moderne Rundholzvermessung. AFZ/Der Wald 3:129 - 131.
- KRAMER, H.; AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. 3. erweiterte Auflage J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main: 266 S.
- KÜLÜR, S. (1998): Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchungen eines digitalen Aufnahmesystems. 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung des DGPF, 15. DFD-Nutzseminar des DLR, 14.-26. Oktober 1998, Technische Universität München, S. 63 - 72

- LUHMANN, T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg: 571 S.
- LWF (1993): Bayrische Landesanstalt Vergleich von Zeitbedarf, Kosten, und Genauigkeit für Wald und Forstwirtschaft, 1993: von Stichprobenverfahren der Vermessung von schwachem Stammholz gegenüber Werkeingangsvermessung sowie Entwicklung eines Konzepts zur Verbuchung ohne Mehrfacherfassung, Abschlußbericht V23, unveröffentlicht zitiert in Guglhör, W.; Feller, S.; Vallaster, K. (1996): Stichprobenvermessung von schwachem Stammholz in Standardlängen. Holz-Zentralblatt Nr. 51: 826 - 834
- MAHLER, G. (1997): Zur Bedeutung des Maßes für Waldbesitz und Holzwirtschaft. In: Wage-laar, R. (1997): Rundholzvermessung mit Harvestern. AFZ/Der Wald 15: 809 - 812
- MAHLER, G. (1998): Erfüllt die Rundholzvermessung Kundenwünsche? AFZ/Der Wald 3: 111
- MAHLER, G.; KLEBES, J. (1990): Verfahrenskonzepte zur organisatorischen Abwicklung der Werksvermessung von Nadelstammholz. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 328 - 332
- MALLOT, H. A. (2000): Sehen und die Verarbeitung visueller Information. Eine Einführung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. F. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden: 285 S.
- MANEK, F. (1950): Erdbildmessung (Terrestrische Photogrammetrie). Halle: 133 S.
- MARJOMAA, J.; SAIRANEN, P. (1996): AVM-1000-Frame image measurement station. Metsäteho Oy, unveröffentlicht: 6 S.
- MATECKI, U. (2003): Klassifikation mit neuronalen Netzen in der Bildverarbeitung. <http://www.informatik.uni-osnabrueck.de/um/96/96.5/matecki/matecki.html> (16.01.04)
- MATERN, B. (1958): On the Geometry of the Cross-section of a Stem. Medd. fr. Statens Skogsforskningsinstitut 46 (11): 28 S.
- MATERN, B. (1990): On the shape of the cross-section of a tree stem – An empirical study of the geometry of mensurational methods. Swedish University of Agricultural Sciences, Section of forest Biometry, Umea, Sweden, Report 28: 47 S.
- MAYER, R. (1983): Darstellung der Schaffform für Einzelstämme. Diplomarbeit Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Forstwissenschaftliche Fakultät
- MELHORN, L.; PLINKE, B. (1985): Qualitätskontrollen in der Holzwerkstoffindustrie mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 403 - 407
- MEYER, R. (1995): Aufbau eines EDV-gestützten Meßsystems für forstliche Anwendungen am Beispiel der Volumenbestimmung von Holzpoltern. Forstwissenschaftlicher Fachbereich der Georg-August-Universität Göttingen, Dissertation: 111 S.
- MICROTEC (2003): <http://www.microtec-austria.com/d/index.htm> (16.01.04)
- MISSAL, K. (2001): Topology adaptive Snakes. Vortrag im Problemseminar „Bildverarbeitung in der Medizin“. Sommersemester 2001 am Institut für Mathematik und Informatik der Universität Leipzig. 14 S. <http://www.informatik.uni-leipzig.de/~ulf/kmissaltext.pdf> (16.01.04)
- MOELL, M. K.; DONALDSON L. A. (2001): Comparison of segmentation methods for digital image analysis of confocal microscope images to measure tracheid cell dimensions. International Association of Wood Anatomists (IAWA) Journal, Vol. 22, No. 3: 267 - 288

- MOËLL, M.; Borgfors, G. (2001): An image Analysis Method to measure cross-sectional tracheid dimensions on softwood increment cores. Wood and fiber science, Vol. 22, No 3: 200 - 212
- MÖLLER, J. J.; Sondell, J. (1998): Das Harvestermaß als Verkaufsmaß. AFZ/Der Wald 3: 132 - 134
- MONGEAU, J.P.; Beauregard, R.; Harless, T. E.G. (1993): Softwood log shadow modelling with shadow scanners. Wood and fiber science 25 (3): 261 - 277
- MOUNTAIN, H. S. (1949): Determining the solid wood volume of fourfeet pulpwood stacks. Journal Forestry 47: 627
- MÜLLER, G. (1957a): Untersuchungen über die Querschnittsformen der Baumschäfte I. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Heft 1/2: 34 - 54
- MÜLLER, G. (1957b): Untersuchungen über die Querschnittsformen der Baumschäfte III. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Heft 11/12: 374 - 381
- MÜLLER, G. M. (1931): Stereometrische Messungen am Bestande. Dissertation. Sächsische Technische Hochschule zu Dresden. Langensalza. Druck von Hermann Beyer und Söhne: 93 S.
- MVTEC SOFTWARE GMBH (2002): Halcon 6.1. MVTec Software GmbH, München.
- NERUDA, J.; VALENTA, J. (2002): Methode der Bestimmung der Volumenkoeffizienten für Schichtholz durch eine Bildanalyse. 6. – 8. März 2002 Treffen der „Sektion Forsttechnik“ des Verbandes Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten, Sopron, Ungarn. Tagungsbericht
- ORMEROD, D. W. (1985): Scaling and Smalian's Formula: Time to change? Forest Chronicle 61 (1): 28 - 30
- PALM, C., FISCHER, B. LEHMANN, T., SPITZER, K. (2000): Adaptive Wasserscheiden-Transformation zur Segmentierung in Farbbildsequenzen der Lippen. 12-14. März 2000 Kongress: Bildverarbeitung für die Medizin, München.
<http://www.imse.med.tu-muenchen.de/mi/bvm2000/program/abstracts/w051.html>
(16.01.04)
- PELZ, D. R. (1980): Stichproben mit variablen Auswahlwahrscheinlichkeiten. AFJZ 151(2): S. 37-41.
- PRODAN, M. (1965) Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.: 644 S.
- REIDELSTÜRZ, P. (1997): Forstliches Anwendungspotential der terrestrisch – analytischen Stereophotogrammetrie. Inaugural – Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- ROTH, H. D. (1983): Elektronisch-optische Oberflächeninspektion von Hölzern. Holz-Zentralblatt 109 (Nr. 108): 1465 – 1466
- SCHAFMEISTER, R. (2000): Eine Einführung in die Photogrammetrie. Leitfaden der Rollei Fototechnic GmbH, Abteilung RolleiMetric, 14 S.
- SCHMID-HAAS, P.; WERNER, J.; BAUMANN, E. (1980): Fehler bei der Rundholzmessung. Schweizerische Zeitung für Forstwesen 131 (9): 801 - 820.
- SCHÖPFER, W. (1990): Zur Rationalisierung der Schwachholzernte. In: Sonderheft Forst und Holz (Jhg. 45) Nr. 12: 314

- SCHWEDISCHER RAT FÜR HOLZVERMESSUNG (1999): Instruktionen zur Holzvermessung für Nadelsägeholz Und Faserholz. Deutsche Bearbeitung unter Mitwirkung der HVG Holzvermessungsgesellschaft mbH Rostock.
<http://www.virkesmatningsradet.org> (16.01.04)
- SILVA, M. S.; CARVALHO, F. D.; GONCALVES, A. N. (1989): Measuring timber truck loads with image processing in paper mills. In: Ying-wei Lin; Ram Srinivasan [Editors]. Proc. SPIE Vol. 1075, p. 399-405, Digital Image Processing Applications.
- SKATTER, S. (1998): Determination of cross-sectional shape of softwood logs from three x-ray projections using an elliptical model. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 179 - 186
- SKATTER, S.; HØIBØ, O. A. (1998): Cross-sectional models of Scots pine (*Pinus silvestris*) and Norway Spruce (*Picea abies*). Holz als Roh- und Werkstoff 56: 187 - 191
- SKATTER, S.; HØIBØ, O. A.; GJERDRUM, P. (1998): Simulated yield in a sawmill using different measurement technologies. Holz als Roh- und Werkstoff 56: 267 - 274
- SMALTSCHINSKI, T. (1983): Individuelle Baumschaffformen und Cubische Spline Funktion. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 155. Jhg., 7/8: 193 - 197
- SMALTSCHINSKI, T. (1986): Fehler bei Stammscheiben- und Bohrspananalysen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 105: 163 -171
- SMALTSCHINSKI, T. (1998): Interpolation von Meßwerten des Segmentzirkels nach BITTERLICH durch parametrische, periodische, kubische Splines. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 169. Jhg. (10 -11): 209 - 211
- SRINIVASAN, M. V.; LAUGHLIN, S. B.; DUBBS, A. (1982): Predictive coding: a fresh view in inhibition in the retina. Proceedings of the royal society (London) B, 216: 427 – 458 in Malot, H. A. (2000): Sehen und die Verarbeitung visueller Information. Eine Einführung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. F. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden: 285 S.
- TIAN, X.; MURPHY, G. E. (1997): Detection of Trimmed and Occluded Branches on Harvested Tree Stems using Texture Analysis. Journal of Forest Engineering No. 2: 65 - 78
- TIREN, L. (1929): Über die Grundflächenberechnung und ihre Genauigkeit. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 25:229 - 300
- TISCHENDORF, W. (1927): Lehrbuch der Holzmassenermittlung, Berlin.
- WAGELAAR, R. (1997): Rundholzvermessung mit Harvestern. AFZ/Der Wald 15: 809 - 812
- WAGNER, C. E. VAN; WILSON, A. L. (1976): Diameter measurement in the Line Intersect Method. Forest Science, Volume 22, No 2: 230 - 232
- WILLIAMSON, R. L. (1975): Out-of-Roundness in Douglas-fir Stems. Forest Science 21 (4): 365 - 370.
- WILWERDING, A.; GROß, M. (1996): Neues Raummaßverfahren für Standardlängen und Industrieholz. AFZ/Der Wald 12: 652 - 656.
- WÖTZEL, M. (1997): Zur Entwicklung der HKS-konformen Harvestervermessung. KWF: Forsttechnische Informationen, Fachzeitschrift für Waldarbeit und Forsttechnik 3: 33 - 35
- WURSTER, M.; WILWERDING, A. (1998): Qualitätsbeurteilung durch optoelektronische Rundholzvermessungsanlagen. AFZ/Der Wald 3: 114 - 117
- ZIMMERMANN, C. (1997): Das Harvestermaß im Praxistest. KWF: Forsttechnische Informationen, Fachzeitschrift für Waldarbeit und Forsttechnik 3: 28 - 33

ZMP (2003): Holzeinschlag 2002 bei rd. 42 Mio. fm. ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH, HOLZ Journal Nr. 23.

12 Anhang

12.1 Verzeichnungsarten in einem Aufnahmesystem

Die „radial-symmetrische Verzeichnung“ stellt den größten Einfluss bei den Abbildungsfehlern dar. Sie entsteht vor allem durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und ist sowohl von der Fokussierung als auch von der Objektentfernung abhängig. Aufgrund dieser Abhängigkeiten wurden bei den Aufnahmen die Objektentfernung und die Brennweite konstant gehalten. Bei radial-symmetrischer Verzeichnung weisen tatsächlich ebene Objekte im Bild eine konkave Wölbung auf (Abbildung 34).

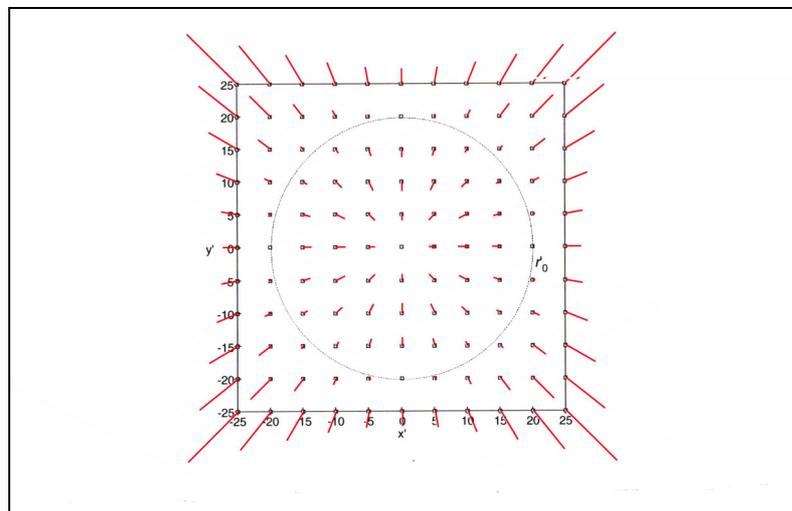


Abbildung 34: Auswirkung der radial-symmetrischen Verzeichnung (aus LUHMANN, 2000)

Die radial-*asymmetrische* Verzeichnung und die *tangentiale* Verzeichnung werden überwiegend durch eine *Dezentrierung* der Linsen im Objektiv verursacht. *Affinität* und *Scherung* sind als weitere Abbildungsfehler zu nennen. Sie geben die Abweichungen des Bildkoordinatensystems hinsichtlich *Orthogonalität* und *Gleichmäßigkeit* der Koordinatenachsen an. Bei analogen Aufnahmesystemen können *Affinität* und *Scherung* durch eine *Affintransformation* (Koordinaten, die in einem $x'-y'$ -System gegeben sind, werden in ein kartesisches $x-y$ -System umgerechnet) auf die Rahmenmarken oder ein *Réseau* (dünne Glasplatte mit Gitter von bekannten Referenzpunkten) kompensiert werden (LUHMANN, 2000). Digitalkameras zeigen diese Effekte bei ungleichmäßiger Anordnung der Sensorelemente. Dies ist jedoch bei der eingesetzten Digitalkamera nicht der Fall.

12.2 Aktive Konturenmodelle

Die Segmentierung mit aktiven Konturenmodellen erfolgt grundsätzlich dadurch, dass der Anwender ein Modell der zu segmentierenden Struktur definiert. Das Modell wird dann möglichst nahe an der gewünschten Kontur interaktiv platziert und initialisiert (per Mausklick wird die „snake“ auf der Stirnfläche gestartet) (MISSAL, 2001). Nach der Initialisierung erfolgt schrittweise die automatische Definition der Kontur, d.h. die Kontur des gewünschten Objekts wird umschlossen.

Bei einer „snake“ handelt es sich um eine Funktion, die als Ausdruck der Energie der Kontur gesehen werden kann. Die „snake“ ist aus Energieteilfunktionen (Verformungseigenschaften der „snake“ und Bildeigenschaften) zusammengesetzt.

Über die Teilfunktionen werden die Energien gesteuert und die Gewichtung der Energien geben vor, wie und in welcher Form sich die „snake“ dem Objekt nähert und es umschließt. Durch eine Minimierung der Funktion und somit der Energien nimmt die „snake“ einen stabilen Gleichgewichtszustand ein und beschreibt in diesem Zustand die Kontur des Objekts.

12.3 Kamerakalibrierung

Bei CCD-Kameras ist sowohl eine geometrische als auch eine radiometrische Kalibrierung notwendig (KÜLÜR, 1998). Der Prozess der Verzeichnungskorrektur stellt ein Resamplingverfahren dar, bei dem anhand der Verzeichnungsparameter jede Bildposition neu berechnet wird. Die Bildkorrektur wird weitgehend automatisiert am PC mittels einer entsprechenden Software durchgeführt. Die Kalibrierung der Kamera wurde am Institut für Angewandte Photogrammetrie der FH Oldenburg vorgenommen (Tabelle 30).

Tabelle 30: Kalibrierungswerte der Nikon Coolpix 990

Kamerahauptpunkt [mm]				Kammerkonstante [mm]	
x	x_s	y	y_s	c	c_s
-0,0140	0,0062	0,004	0,0051	16,2311	0,0052

Die Kamerakalibrierung der *Nikon Coolpix 990* wurde bei einer Brennweite von 16,2 mm durchgeführt. Für jede Aufnahme musste an der Kamera diese Brennweite eingestellt werden, da die Brennweite der Kamera im Gegensatz zu Messkameras variabel ist.

Die Kamerakalibrierung der *Seagull 6x6* ergab folgende Abweichung des Kamerahauptpunktes vom Bildkoordinatensystem und die Kammerkonstante c (Tabelle 31).

Tabelle 31: Kalibrierungswerte der Seagull 6x6

Kamerahauptpunkt [mm]				Kammerkonstante [mm]	
x	x_s	y	y_s	c	c_s
0,23700	0,02620	-0,50008	0,0463	74,74373	0,0214

12.4 Abbildung von Objekten mit unterschiedlicher Aufnahmeentfernung

Die Abbildungsunterschiede von Objekten, die in verschiedenen Entfernungen von der aufnehmenden Kamera liegen, lassen sich anhand der Abbildung 35 erklären.

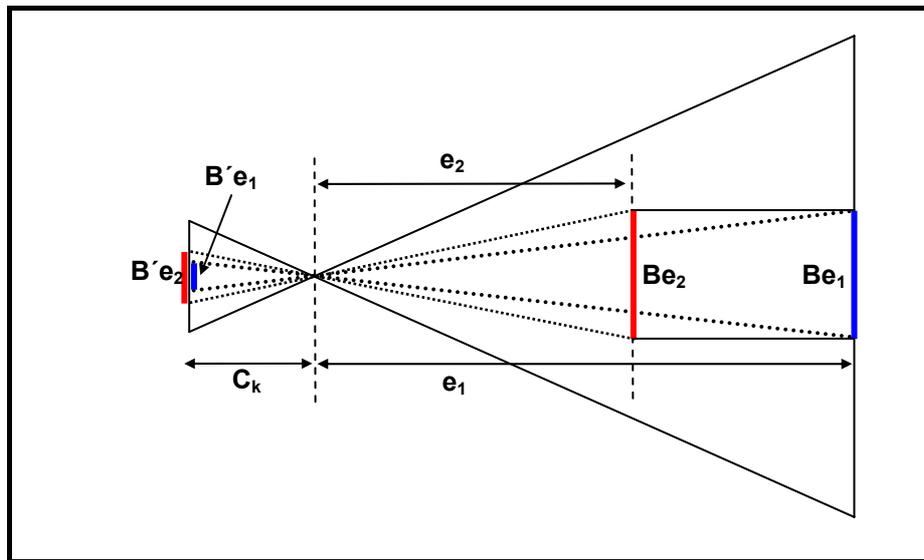


Abbildung 35: Abbildungsgröße von Objekten mit unterschiedlicher Aufnahmeentfernung in einer Kamera

Werden zwei gleichgroße Objekte Be_2 und Be_1 , die sich in den Entfernungen e_2 und e_1 von der Kamera befinden, bei einer konstanten Kammerkonstanten C_k fotografiert, so wird das näher an der Kamera liegende Objekt Be_2 größer ($B'e_2$) und das weiter von der Kamera entfernte Objekt kleiner ($B'e_1$) in der Kamera abgebildet. Nach diesem Modell ergibt sich bei einer Aufnahmeentfernungsdifferenz von 0,5 m zwischen zwei gleichgroßen Objekten eine Flächenabbildungsdifferenz von $\pm 5\%$.

12.5 Fourierkoeffizienten und Fourierdeskriptoren

Die Fourierkoeffizienten und Fourierdeskriptoren können (BURKHARDT, 1993 und 2002) wie folgt hergeleitet werden.

Die Stirnflächenform ist durch ihre Kontur eindeutig festgelegt. Die Konturbeschreibung erfolgt parametrisch im komplexen Raum (Abbildung 36).

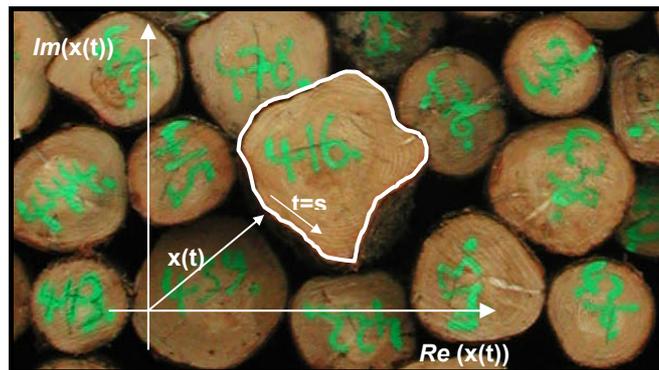


Abbildung 36: Darstellung einer Stirnflächenkontur als komplexe Funktion der Bogenlänge t nach BURKHARDT (2002)

Ein vektorieller Zeiger $x(t)$ – z.B. die Bogenlänge – beschreibt parametrisch die Kontur, die im komplexen Raum über einen Realteil $\text{Re}(x(t))$ und einen Imaginärteil $\text{Im}(x(t))$ verfügt.

Nach BURKHARDT (2002) stellen geschlossene Konturen periodische Funktionen der Form dar:

$$x(t+kT) = x(t) \quad (13) \quad \text{mit} \quad T = \text{Periode} \\ k = \text{Anzahl der Durchläufe}$$

Die Kontur der Stirnfläche kann somit als komplexe periodische Funktion bezüglich des ganzen Umfangs T und damit auch als Fourierreihe beschrieben werden. Die Fourierreihe hat folgende Darstellung:

$$x(t) = \sum_{n=-N/2}^{n=+N/2} c_n e^{jn\omega t} \quad (14) \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi / T \\ j = \text{Imaginärteil}$$

Die Konturen der Stirnflächen werden mit einer endlichen Anzahl von Fourierkoeffizienten, die mit dieser Reihe errechnet werden, beschrieben.

Die so beschriebenen Konturen werden als Menge der bandbegrenzten periodischen Muster bezeichnet. Die Bandbegrenztheit der Muster ergibt sich aus der Festlegung der zulässigen Frequenzen eines gewissen Spektralbereichs und das Muster lässt sich mit $(N+1)$ komplexen Fourierkoeffizienten c_n eindeutig beschreiben (BURKHARDT, 1993). Durch die Beschränkung auf wenige (niederfrequente) Koeffizienten ergibt sich eine wesentliche Datenreduktion im Spektralbereich im Vergleich zu den abgetasteten Werten (hier: markierte Punkte des Polygonzugs auf der Stirnfläche) (BURKHARDT, 2002). Die Fourierkoeffizienten der Fourierreihe (14) werden errechnet nach:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j\pi n t / T} dt \quad (15)$$

Geometrisch gesehen stellt der aus der Fourierreihe errechnete nullte FK c_0 die Lage des Linienschwerpunktes der Kontur dar (BURKHARDT, 1993). „Eine Fourierreihe mit nur einem Koeffizienten stellt einen Kreis dar [...]“ (BURKHARDT, 2002). In Kombination mit dem dazugehörigen negativen Fourierkoeffizienten ergibt sich eine Ellipse. Die Fourierkoeffizienten c_n und c_{-n} beschreiben eine Ellipse, die n -mal durchlaufen wird.

Es ergeben sich folgende Stirnflächenkonturen, die mit unterschiedlichen Anzahlen an FK rekonstruiert wurden (Abbildung 37-Abbildung 42).

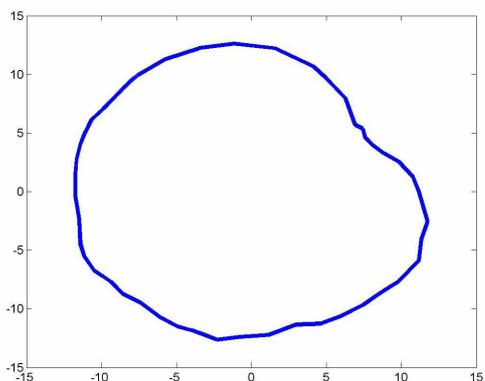


Abbildung 37: Stirnflächenkontur (Polygonzug)

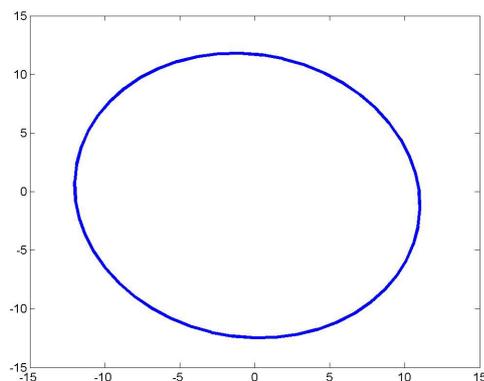


Abbildung 38: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=2$

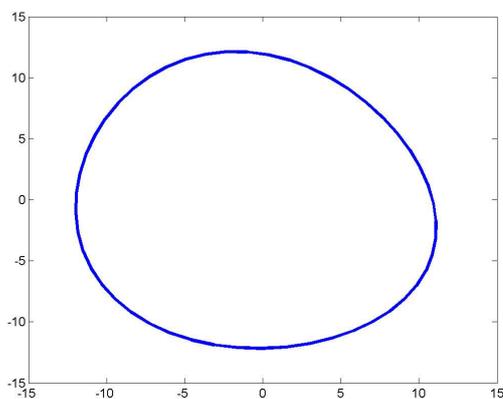


Abbildung 39: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=3$

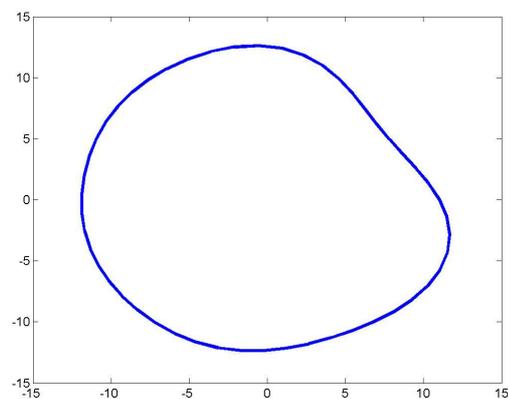


Abbildung 40: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=4$

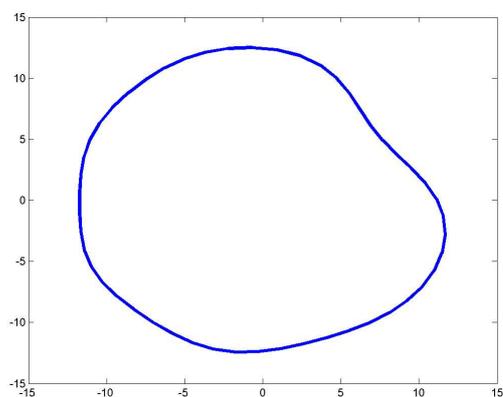


Abbildung 41: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=7$

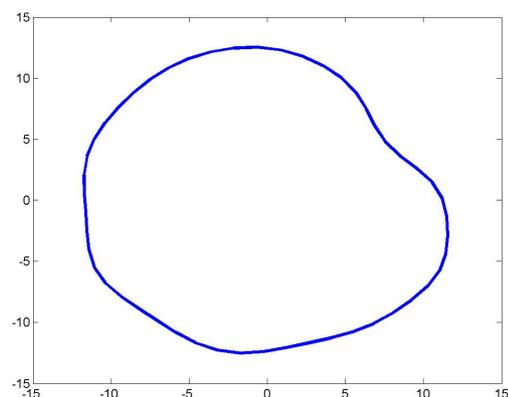


Abbildung 42: Fouriersynthese der Stirnflächenkontur mit $n=9$

Unabhängig davon, mit welchem Fourierkoeffizienten die Reihe abgebrochen wird, handelt es sich bei der Rücktransformation der bis dahin errechneten Fourierkoeffizienten um die „best-approximation“ an die ursprüngliche Kontur. Dabei ist der quadratische Fehler zwischen der Kontur der abgebrochenen Reihe und der ursprünglichen Kontur entlang der Kurve minimal (BURKHARDT, 2002).

Bei einer Phasenveränderung von nur einem Koeffizienten trotz unverändertem Amplitudenspektrum kann die „Original-Stirnflächenkontur“ nicht mehr rekonstruiert werden. Aus diesem Grund wird aus den Fourierkoeffizienten ein vollständiger Satz von lageinvarianten und vergrößerungsinvarianten Merkmalen (Fourierdeskriptoren) abgeleitet, „indem [man] deren Beträge normiert und ihre Argumente durch eine eindeutige Nebenbedingung fixiert [werden].“ Die Fourierdeskriptoren sind im weiteren Sinn die Fourierkoeffizienten eines Objekts in einer normierten Position und Größe (BURKHARDT, 2002).

Zur Berechnung der Fourierdeskriptoren werden folgende Überlegungen angestellt: Bei den Stirnflächenkonturen kann aufgrund einer zu beobachtenden Asymmetrie eine Rotations-symmetrie praktisch ausgeschlossen werden.

Zusätzlich ist der Fourierkoeffizient c_1 oder c_{-1} bei den Stirnflächenkonturen sehr dominant, da er für kreisförmige Stirnflächen die Grundstruktur der Kontur beschreibt. Die Berechnung der Fourierdeskriptoren wird gemäß dieser Überlegungen nach folgender Gleichung durchgeführt (BURKHARDT, 1993):

$$\tilde{\chi}_n = \frac{|c_n|}{|c_1|} \cdot e^{j(\phi_n + (1-n)\phi_2 - (2-n)\phi_1)} \quad (16)$$

Fourierdeskriptoren sind invariant gegenüber einer Translation, einer Rotation, einer radialen Streckung und einer Aufpunktverschiebung der Kontur. Sie können ebenso wie die Fourierkoeffizienten spektral interpretiert werden.

12.6 Abbildungen und Tabellen

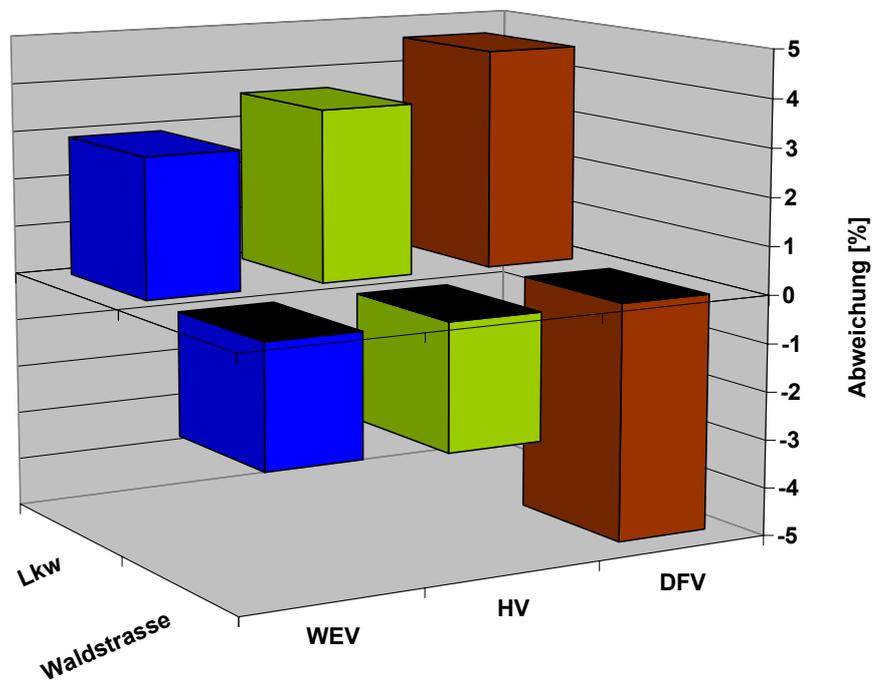


Abbildung 43: Prozentuale, mittlere Abweichung der aufsummierten Stirnflächen der Werkeingangsvermessung (WEV), der Harvestervermessung (HV) und der dreidimensionalen foto-optischen Vermessung (DFV) je Aufnahme zu den aufsummierten Stirnflächen der zweidimensionalen foto-optischen Vermessung getrennt nach den Aufnahmeorten Lkw (Werkseingang) und Waldstraße

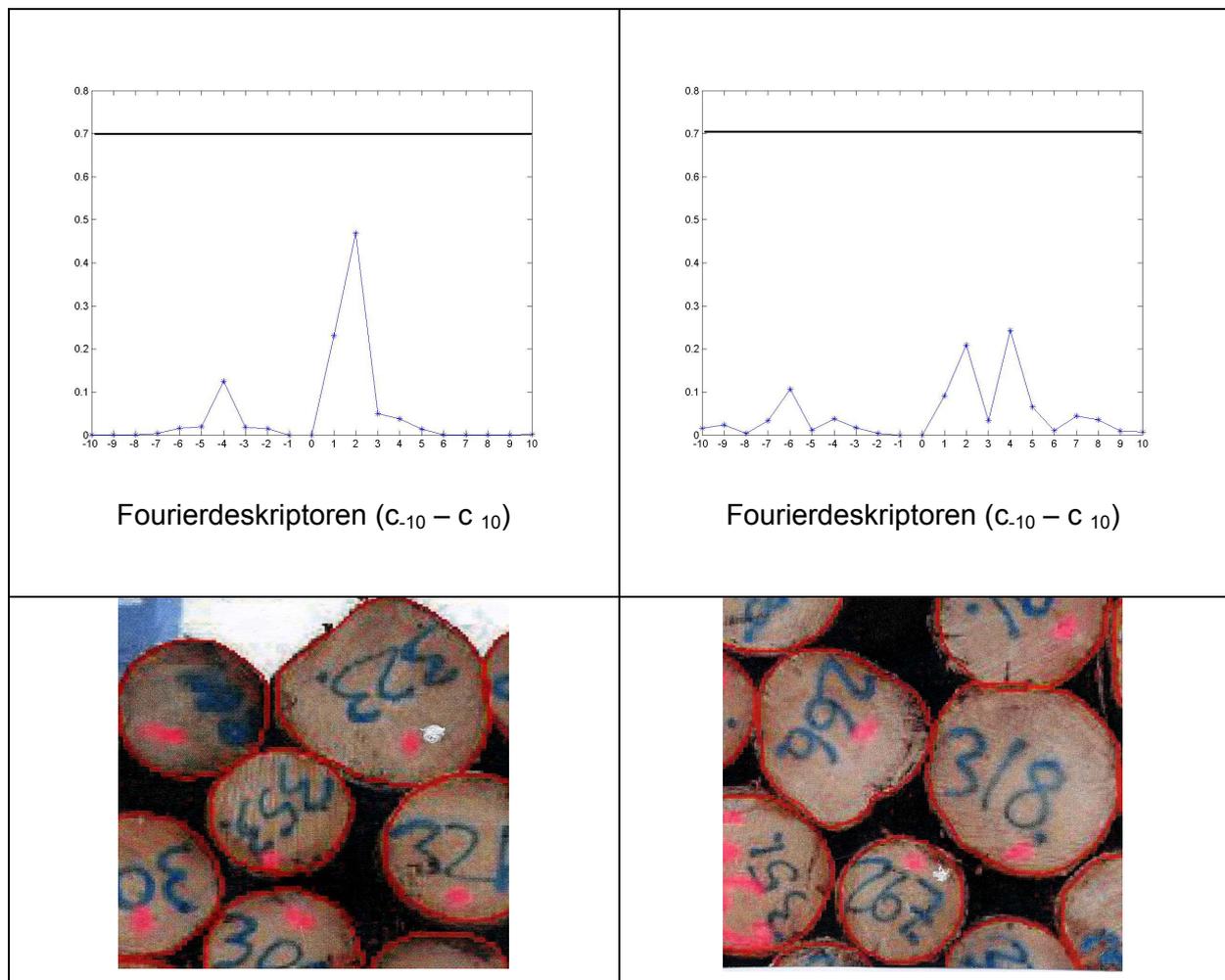


Abbildung 44: Periodogramm einer Stirnfläche mit Wurzelanlauf (323; links) und einer runden Stirnfläche (267; rechts) mit der beschriebenen 70 % Schwingungsschwelle

Tabelle 32: Einfaktorielle Varianzanalyse der Variablen $\log s^2_{res}$ zwischen den Formklassen „rund“, „unrund“, „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ mit Scheffé-Prozedur (der visuellen Klassifikation)

(a)

Oneway ANOVA

Variable: $\log s^2_{res}$

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	74,889	2	37,444	382,500	,000
Innerhalb der Gruppen	182,866	1868	,098		
Gesamt	257,755	1870			

(b)

MehrfachvergleicheAbhängige Variable: $\log s^2_{res}$
Scheffé-Prozedur

(I) Formklasse	(J) Formklasse	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,2790(*)	,01519	,000	-,3163	-,2418
	3	-,7192(*)	,02847	,000	-,7890	-,6495
2	1	,2790(*)	,01519	,000	,2418	,3163
	3	-,4402(*)	,02793	,000	-,5086	-,3718
3	1	,7192(*)	,02847	,000	,6495	,7890
	2	,4402(*)	,02793	,000	,3718	,5086

* Die mittlere Differenz ist auf der Stufe .05 signifikant.

(c)

Homogene UntergruppenVariable: $\log s^2_{res}$
Scheffé-Prozedur

Formklasse	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
1	749	-1,0708		
2	978		-,7917	
3	144			-,3515
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 322,509.

b Die Gruppengrößen sind nicht identisch. Es wird das harmonische Mittel der Gruppengrößen verwendet. Fehlerniveaus des Typs I sind nicht garantiert.

Tabelle 33: Clusterzentrenanalyse mit drei Clusterzentren und 14 Iterationsschritten

(a)

Anfängliche ClusterzentrenVariable: $\log s^2_{res}$

	Cluster		
	1	2	3
\log^2_{res}	-1,84	-,70	,45

(b)

Iterationsprotokoll(a)

Iteration	Änderung in Clusterzentren		
	1	2	3
1	,446	,126	,397
2	,111	,009	,211
3	,041	,008	,069
4	,013	,001	,027
5	,006	,001	,015
6	,001	,001	,005
7	,000	,001	,002
8	,000	,001	,002
9	,000	,001	,002
10	,001	,002	,003
11	,001	,001	,000
12	,000	,000	,000
13	,000	,000	,000
14	,000	,000	,000

a Konvergenz wurde aufgrund geringer oder keiner Änderungen der Clusterzentren erreicht. Die maximale Änderung der absoluten Koordinaten für jedes Zentrum ist ,000. Die aktuelle Iteration lautet 14. Der Mindestabstand zwischen den anfänglichen Zentren beträgt 1,144.

(c)

Clusterzentren der endgültigen LösungVariable: $\log s^2 \text{res}$

	Cluster		
	1	2	3
$\log^2 \text{res}$	-1,23	-,81	-,29

(d)

Anzahl der Fälle in jedem Cluster

Cluster	1	711
	2	814
	3	354
Gültig		1879
Fehlend		1016

Tabelle 34: *Einfaktorielle Varianzanalyse der Variablen $\log s^2_{res}$ zwischen den Formklassen „rund“, „unrund“, „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“ mit Scheffé-Prozedur (mathematischer Klassifikation)*

(a)

Oneway ANOVA

Variable: $\log s^2_{res}$

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	213,336	2	106,668	4369,477	,000
Innerhalb der Gruppen	45,797	1876	,024		
Gesamt	259,132	1878			

(b)

Mehrfachvergleiche

Abhängige Variable: $\log s^2_{res}$

Scheffé-Prozedur

(I) Formklasse	(J) Formklasse	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,4141(*)	,00802	,000	-,4338	-,3945
	3	-,9394(*)	,01016	,000	-,9643	-,9145
2	1	,4141(*)	,00802	,000	,3945	,4338
	3	-,5253(*)	,00995	,000	-,5496	-,5009
3	1	,9394(*)	,01016	,000	,9145	,9643
	2	,5253(*)	,00995	,000	,5009	,5496

* Die mittlere Differenz ist auf der Stufe .05 signifikant.

(c)

Homogene Untergruppen

Variable: $\log s^2_{res}$

Scheffé-Prozedur

Formklasse	N	Untergruppe für Alpha = .05.		
		1	2	3
1	711	-1,2271		
2	814		-,8129	
3	354			-,2877
Signifikanz		1,000	1,000	1,000

Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

a Verwendet ein harmonisches Mittel für Stichprobengröße = 549,468.

b Die Gruppengrößen sind nicht identisch. Es wird das harmonische Mittel der Gruppengrößen verwendet.

Fehlerniveaus des Typs I sind nicht garantiert.

Tabelle 35: Korrelationskoeffizienten r nach Pearson zwischen den Stirnflächen der ZFV und der WEV für die visuellen und mathematischen Formklassen „rund“, „unrund“ und „Stirnflächen mit Wurzelanlauf“

Klassifikation		rund	unrund	Wurzelanlauf
ZFV – WEV [n]	visuell	0,967 [719]	0,952 [915]	0,856 [138]
ZFV – WEV [n]	mathematisch	0,966 [592]	0,962 [676]	0,924 [301]

Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 36: Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den Zusammenhang zwischen zweidimensional foto-optischer Stirnfläche und Werkeingangsvolumen – getrennt nach visuellen Formklassen, Abschnittslänge und Fuß- und Zopfseite

		WEV-Volumen					
		visuelle Formklassen					
		Rund		Unrund		Wurzelanlauf	
		5 m	6 m	5 m	6 m	5 m	6 m
Zopf	Stirnflächen ZFV [n]	0,948 [256]	0,953 [97]	0,947 [252]	0,943 [75]	-	-
Fuß	Stirnflächen ZFV [n]	0,955 [196]	0,932 [90]	0,876 [296]	0,712 [202]	0,508 [83]	0,689 [43]

Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 37: Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den Zusammenhang zwischen zweidimensional foto-optischer Stirnfläche und Werkeingangsvolumen – getrennt nach mathematischen Formklassen, Abschnittslänge und Fuß- und Zopfseite

		WEV-Volumen					
		mathematische Formklassen					
		Rund		Unrund		Wurzelanlauf	
		5 m	6 m	5 m	6 m	5 m	6 m
Zopf	Stirnflächen ZFV [n]	0,938 [235]	0,950 [106]	0,947 [174]	0,957 [51]	0,947 [28]	
Fuß	Stirnflächen ZFV [n]	0,962 [121]	0,899 [53]	0,932 [250]	0,854 [134]	0,764 [122]	0,745 [133]

Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 38: Korrelationskoeffizienten r nach Pearson für den jeweils stärksten Zusammenhang zwischen Stirnflächentypen des ZFV an Abschnittfuß- und -zopfseiten und Werkeingangsvolumen (WEV) – getrennt nach Art der Klassifikation, Formklassen und Abschnittslängen

Klassifikation	Stirnflächentyp	WEV-Volumen						
		Formklasse						
		Rund		Unrund		Wurzelanlauf		
		5 m	6 m	5 m	6 m	5 m	6 m	
visuell	Zopf	ZFV [n]	0,948 [256]	0,953 [97]	0,947 [252]	0,943 [75]	-	-
	Fuß	ZFV [n]	0,955 [196]	0,932 [90]	-	-	-	-
		ZFV min. Rad. [n]	-	-	0,891 [296]	0,721 [201]	0,635 [84]	0,765 [43]
mathem.	Zopf	ZFV [n]	0,938 [235]	0,950 [106]	0,947 [174]	0,957 [51]	0,947 [28]	-
	Fuß	ZFV [n]	0,962 [121]	0,899 [53]	0,932 [250]	-	-	0,745 [133]
		ZFV min. Rad. [n]	-	-	-	0,866 [134]	0,799 [123]	-

Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 39: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise summierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$\left(\frac{\sum \text{Volumina WEV}}{\sum \text{Volumina ZFV}_{opt}} - 1 \right) \times 100$	Werkseingang [10]	0,1	0,4	2,2	-3,7	3,5	-0,223	n.s.
	Waldstraße [18]	0,4	0,0	3,6	-5,8	9,2		
	Gesamt [28]	0,3	0,3	3,1	-5,8	9,2		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 40: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³]

Variable [m ³]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (WEV – ZFV)	Werkseingang [10]	0,000	0,010	0,287	-0,544	0,403	-0,001	n.s.
	Waldstraße [18]	0,000	0,004	0,259	-0,661	0,442		
	Gesamt [28]	0,000	0,011	0,269	-0,661	0,442		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 41: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und der „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina WEV}}{\sum \text{Volumina ZFV}} - 1) \times 100$	Werkseingang [10]	0,2	0,1	2,4	-4,2	3,7	-0,272	n.s.
	Waldstraße [18]	0,5	0,1	3,5	-5,7	9,4		
	Gesamt [28]	0,4	0,1	3,2	-5,7	9,4		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 42: Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Volumina der WEV und der „optimierten“ ZFV – bezogen auf den Einzelabschnitt [%] – für 100 % der Fälle

Variable [%]	n	\bar{x}	Median	s	S \bar{x}	MIN	MAX
$(\frac{\text{Abschnittsvolumina WEV}}{\text{Abschnittsvolumina ZFV}_{opt}} - 1) \times 100$	1407	-0,019	-0,271	9,917	0,264	-33,87	40,09

Tabelle 43: Deskriptive Statistik und t-Test für die Abschnittsvolumina des zweidimensionalen foto-optischen Verfahrens (ZFV) und der Harvestervermessung (HV) [m³]

Variable [m ³]	n	\bar{x}	Median	s	VK [%]	MIN	MAX	Summe	t	Sig.
Volumen HV	927	0,164	0,157	0,05	30,5	0,09	0,35	152,30	-13,03	*
Volumen ZF	927	0,178	0,170	0,05	28,1	0,10	0,35	164,76		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei gepaarten Stichproben)

Tabelle 44: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvestervermessung (HV) und des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³]

Variable [m ³]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (HV – ZFV)	Werkseingang [5]	-0,866	-0,978	0,429	-1,322	-0,310	-0,932	n.s.
	Waldstraße [13]	-0,625	-0,661	0,508	-1,671	0,058		
	Gesamt [18]	-0,692	-0,695	0,488	-1,671	0,058		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 45: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvesterermessung (HV) und der „optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina HV}}{\sum \text{Volumina ZFV}_{opt}} - 1) \times 100$	Werkseingang [5]	-7,6	-7,7	2,2	-10,4	-5,2	-0,050	n.s.
	Waldstraße [13]	-7,5	-8,2	4,5	-16,0	1,1		
	Gesamt [18]	-7,5	-8,1	4,0	-16,0	1,1		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 46: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten Abschnittsvolumina der Harvesterermessung (HV) und der „nicht-optimierten“ Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina HV}}{\sum \text{Volumina ZFV}} - 1) \times 100$	Werkseingang [5]	-7,5	-8,9	3,1	-10,9	-3,6	-0,041	n.s.
	Waldstraße [13]	-7,4	-9,1	4,8	-15,9	1,3		
	Gesamt [18]	-7,5	-9,0	4,3	-15,9	1,3		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 47: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina WEV}_{HKS}}{\sum \text{Volumina ZFV}_{HKS opt}} - 1) \times 100$	Werkseingang [12]	0,6	0,3	1,6	-2,3	3,0	-0,231	n.s.
	Waldstraße [20]	0,9	0,7	3,3	-6,1	8,3		
	Gesamt [32]	0,8	0,5	2,7	-6,1	8,3		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 48: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³]

Variable [m ³]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina ($WEV_{HKS} - ZFV_{HKS}$)	Werkseingang [12]	0,08	0,04	0,19	-0,26	0,46	0,405	n.s.
	Waldstraße [20]	0,04	0,09	0,25	-0,64	0,43		
	Gesamt [32]	0,06	0,05	0,22	-0,64	0,46		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 49: Deskriptive Statistik für die ins Verhältnis gesetzten Volumina der HKS-konform ermittelten WEV und der HKS-konform ermittelten „optimierten“ ZFV – bezogen auf den Einzelabschnitt – [%] für 100 der Fälle

Variable [%]	n	\bar{x}	Median	s	S \bar{x}	MIN	MAX
$(\frac{\text{Abschnittsvolumina } WEV_{HKS}}{\text{Abschnittsvolumina } ZFV_{HKS \text{ opt}}} - 1) \times 100$	1682	0,367	0,000	11,94	0,291	-38,89	47,62

Tabelle 50: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Werkeingangsvermessung (WEV) und den „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina } WEV_{HKS}}{\sum \text{Volumina } ZFV_{HKS}} - 1) \times 100$	Werkseingang [12]	0,9	0,3	2,1	-2,1	5,7	-0,314	n.s.
	Waldstraße [20]	1,2	1,6	3,6	-5,7	8,6		
	Gesamt [32]	1,1	0,5	3,1	-5,7	8,6		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 51: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung (KL) und den aufsummierten „optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$(\frac{\sum \text{Volumina } KL}{\sum \text{Volumina } ZFV_{HKS \text{ opt}}} - 1) \times 100$	Werkseingang [12]	-2,0	-1,9	1,7	-4,3	0,7	-0,530	n.s.
	Waldstraße [20]	-1,3	-1,2	4,0	-10,1	7,2		
	Gesamt [32]	-1,5	-1,4	-3,3	-10,1	7,2		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 52: Deskriptive Statistik und t-Test für die Differenz der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung und der aufsummierten „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [m³]

Variable [m ³]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
Differenz sum. Volumina (KL – ZFV _{HKS})	Werkseingang [12]	-0,21	-0,27	0,23	-0,48	0,31	-1,078	n.s.
	Waldstraße [20]	-0,1	-0,03	0,3	-1,08	0,27		
	Gesamt [32]	-0,14	-0,12	0,27	-1,08	0,31		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 53: Deskriptive Statistik und t-Test für das Verhältnis der bildweise aufsummierten HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina der Kluppung und den aufsummierten „nicht-optimierten“ HKS-konform ermittelten Abschnittsvolumina des zweidimensional foto-optischen Verfahrens (ZFV) je Bild [%]

Variable [%]	Aufnahmeort [-anzahl]	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX	t	Sig.
$\left(\frac{\sum \text{Volumina Kluppe}}{\sum \text{Volumina ZFV}_{HKS}} - 1 \right) \times 100$	Werkseingang [12]	-1,7	-2,2	2,2	-4,1	3,9	-0,561	n.s.
	Waldstraße [20]	-1,0	-0,7	4,1	-9,7	7,5		
	Gesamt [32]	-1,2	-1,3	3,5	-9,7	7,5		

* signifikante Unterschiede auf dem Niveau von $\alpha = 0,05$ (t-Test bei unabhängigen Stichproben)

Tabelle 54: Beobachtete Abschnittszahl je Durchmesserklasse für aus der WEV ermittelten Mittendurchmesser im Vergleich zur erwarteten Abschnittszahl (hier: mittlerer Durchmesser aus der ZFV)

	Beobachtetes N	Erwartete Anzahl	Residuum
,15	25	42,9	-17,9
,16	153	109,7	43,3
,17	166	241,3	-75,3
,18	189	349,9	-160,9
,19	239	156,5	82,5
,20	230	248,2	-18,2
,21	170	175,5	-5,5
,22	157	76,8	80,2
,23	105	111,7	-6,7
,24	64	43,9	20,1
,25	54	33,9	20,1
,26	31	10,0	21,0
,27	11	5,0	6,0
,28	17	6,0	11,0
Gesamt	1611		

Tabelle 55: Chi-Quadrat-Test für die Variable WEV-Mittendurchmesser

	WEV-Mittendurchmesser
Chi-Quadrat(a)	344,390
df	13
Asymptotische Signifikanz	,000

a. Bei 0 Zellen (,0%) werden weniger als 5 Häufigkeiten erwartet.
Die kleinste erwartete Zellenhäufigkeit ist 5,0.

Tabelle 56: Deskriptive Statistik für die Differenz der mittleren Durchmesser des ZFV und den Mittendurchmessern der WEV [m]

Variable	n	\bar{x}	Median	s	MIN	MAX
Mittlere Durchm. _{ZFV} - Mittendurchm. _{WEV}	1616	-0,0062	-0,010	0,0132	-0,05	0,04

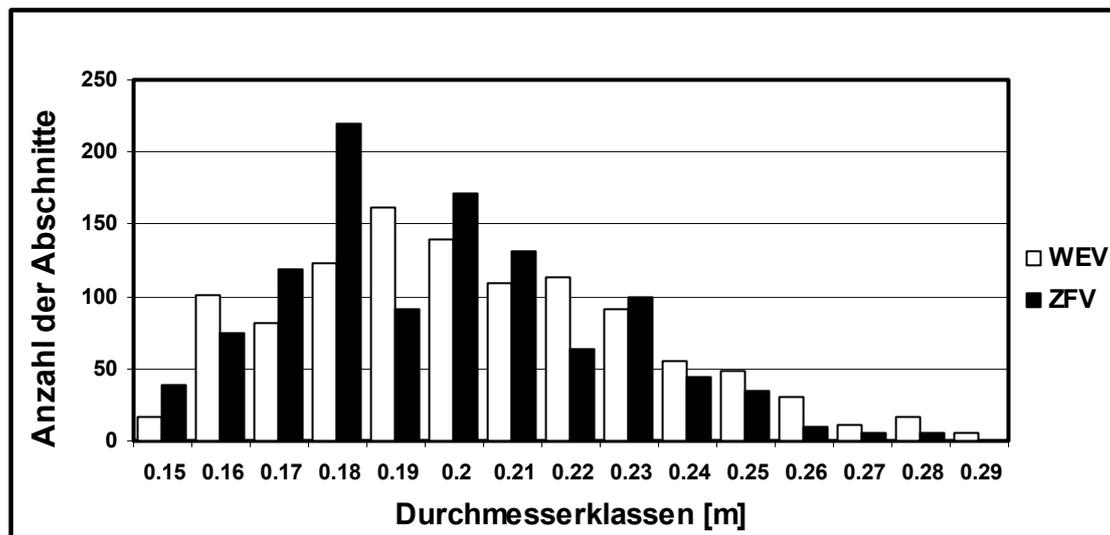


Abbildung 45: Zuordnung der Fichtenabschnitte der Länge 5 m zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV

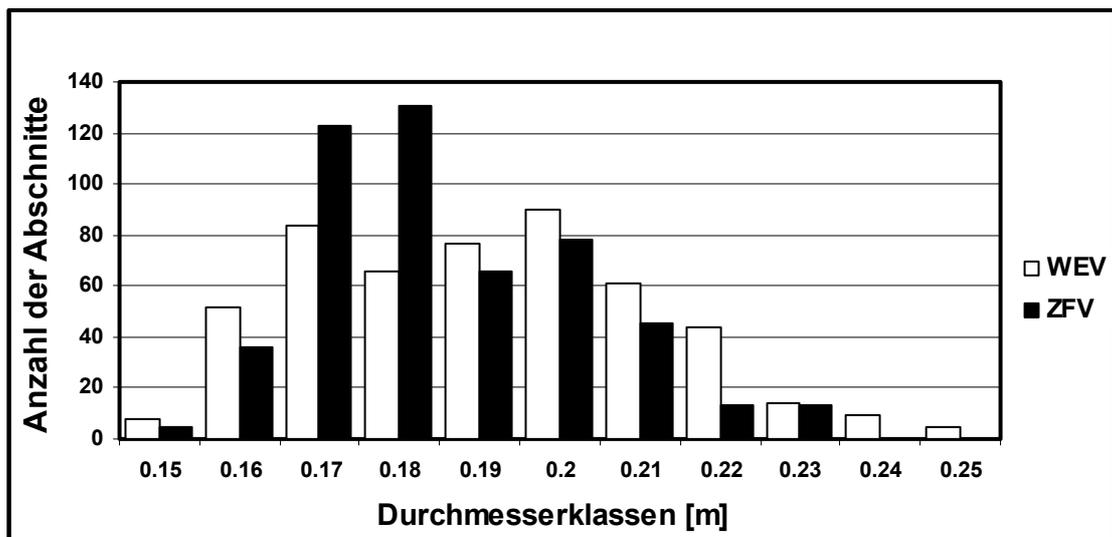


Abbildung 46: Zuordnung der Fichtenabschnitte der Länge 6 m zu den Durchmesserklassen nach WEV und ZFV

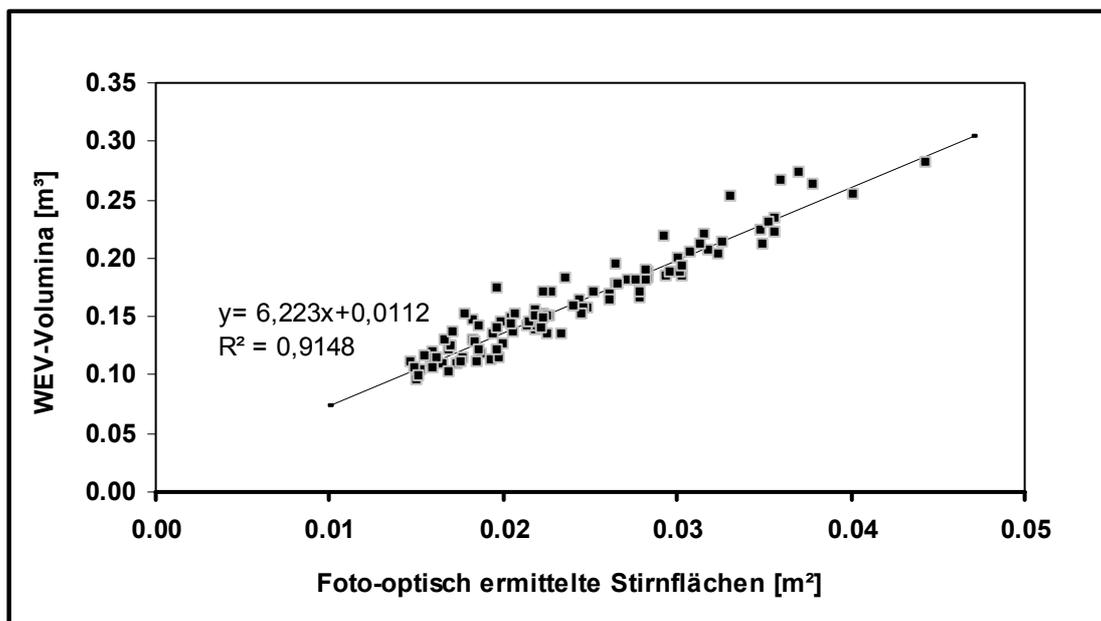


Abbildung 47: Streudiagramm der in der WEV ermittelten Abschnittsvolumina über den foto-optisch ermittelten Stirnflächen für das Teilkollektiv „Länge 5 m – Zopfstirnfläche - rund“ (n=104)