Fachhochschule Weihenstephan

Fachbereich Wald und Forstwirtschaft

Diplomarbeit

Untersuchung polarer Aufnahmeverfahren in der forstlichen Vermessung und Entwicklung einer praxistauglichen Software zur Auswertung der Daten mit Übernahme in GIS-Systeme

Verfasser:

Johannes M. Loose

Betreuer:

Prof. Dr. Steffen Rogg

Zweitkorrektor:

Prof. Dr. Helge Peters

Freising, Mai 2008

Erklärung

Name des Diplomanden: **Johannes M. Loose**
Name des Betreuers: **Prof. Dr. Steffen Rogg**

Thema der Diplomarbeit:

Untersuchung polarer Aufnahmeverfahren in der forstlichen Vermessung und Entwicklung einer praxistauglichen Software zur Auswertung der Daten mit Übernahme in GIS-Systeme.

Ich erkläre hiermit, dass ich die Diplomarbeit gemäß § 31 Abs. 7 der Rahmenprüfungsordnung für die Fachhochschulen (RaPO) in der jeweils gültigen Fassung selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Weihenstephan, den	02.05.2008		
	Datum		Unterschrift Diplomand(in)

Ich bin einverstanden, dass die von mir angefertigte Diplomarbeit über den Fachbereich Wald und Forstwirtschaft der Fachhochschule Weihenstephan einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

☐ Nein
☒ Ja, nach Abschluss des Prüfungsverfahrens
☐ Ja, nach Ablauf einer Sperrfrist von Jahren

Ich erkläre und stehe dafür ein, dass ich der alleinige Inhaber aller Rechte an der Diplomarbeit bin und dass durch deren öffentliche Zugänglichmachung weder Rechte und Ansprüche Dritter noch gesetzliche Bestimmungen verletzt werden.

Weihenstephan, den	02.05.2008		
	Datum		Unterschrift Diplomand(in)

Danksagung

An dieser Stelle sei allen Personen, die zur Entwicklung des Aequometers und der Untersuchung polarer Aufnahmeverfahren beigetragen haben, mein Dank ausgesprochen. Die Arbeit entstand an der Fachhochschule Weihenstephan, Fakultät Wald und Forstwirtschaft im Fachbereich Forstliche Biometrie und Informatik. Herrn Professor Dr. Rogg danke ich für die Betreuung der Diplomarbeit und die fachliche Unterstützung. Herrn Dr. Zander, der in meinem Studiengang Vermessungskunde lehrte, gilt mein besonderer Dank für die Hilfe bei der Umsetzung des Rechenweges in Excel und die Diskussion fachlicher Fragestellungen.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Simbeck vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten und Herrn Halbritter von der Staatlichen Führungsakademie für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten bedanken. Sie ermöglichten den Einsatz des Aequometers für die Flächenermittlung bei der forstlichen Förderung in Bayern. Durch die vorbildliche Kommunikation und Hilfestellungen bei technischen Problemen und in der Praxis aufgetretenen Schwierigkeiten konnte die Einsetzbarkeit sichergestellt werden.

Weiterhin sei den Sachgebieten „GIS und Fernerkundung“, EDV und „Wissenstransfer und Waldpädagogik“ der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft für die vielschichtige Unterstützung gedankt.

Einen großen Beitrag haben auch Revierleiter und Qualitätsbeauftragte für Förderung in Bayern, sowie mehrere Privatpersonen geleistet. Durch zahlreiche Anregungen und Rückmeldungen aus der Praxis konnte der Aequometer entscheidend verbessert werden. Das Bereitstellen von Daten durch Revierleiter ermöglichte eine statistische Untersuchung von in der Praxis gemessenen Flächen. Es sei mir verziehen, wenn an dieser Stelle keine Namen genannt werden, denn die Liste wäre lang und jedem Einzelnen gebührt mein Dank.

Mein ausgesprochener Dank gebührt jenen, die direkt zur Entwicklung des Aequometers beigetragen haben. Im Besonderen Philipp Edelmann für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung des Octave Programms zur Fehlerschätzung; weiterhin Rob Bovey, der den Quelltext des „XY Chart Labeler“ zur Verfügung stellte und Mohammed Hammoud, der den „Shape Viewer“ beisteuerte. Im Quellcode des Aequometers sind verschiedene Teile aus anderen Programmen leicht verändert übernommen worden. Deren Autoren danke ich für Ihr Einverständnis. Ein Hinweis darauf befindet sich in den betreffenden Stellen des Quellcodes.

Nicht zuletzt möchte ich mich für die persönliche Unterstützung in der Familie und im Freundeskreis bedanken, die mir beim Verfassen der vorliegenden Arbeit sehr geholfen hat.

Inhalt

Seite

1. **Einleitung** ... 9
1.1. Vermessung im Forst ... 9
1.2. Ein Werkzeug zur Auswertung ... 9
1.3. Aufbau der Arbeit ... 10

2. **Vermessung und Auswertung** ... 11
2.1. **Hilfsmittel** ... 11
2.1.1. Fluchtstab ... 11
2.1.2. Schnurlot ... 11
2.1.3. Winkelprisma ... 11

2.2. **Streckenmessung** ... 12
2.2.1. Messband ... 12
2.2.2. Fadenmessgerät ... 12
2.2.3. Elektronische Distanzmessgeräte ... 13
2.2.4. Ungebräuchliche Distanzmessgeräte ... 14

2.3. **Messung des Azimuts** ... 14
2.3.1. Einheiten ... 14
2.3.2. Messgeräte ... 15
2.3.3. Kompassfehler ... 16

2.4. **Neigungsmessung** ... 18
2.4.1. Messgeräte ... 18
2.4.2. Skalenteilung ... 18
2.4.3. Messfehler ... 18

2.5. **Koordinatensysteme** ... 19

2.6. **Aufnahmetechnik** ... 20
2.6.1. Grundlegende Arbeiten ... 20
2.6.2. Umgang mit dem Fluchtstab ... 20
2.6.3. Abstecken von Geraden, Fluchten ... 20
2.6.4. Absetzen rechter Winkel ... 21
2.6.5. Streckenmessung ... 22
2.6.6. Messung des Azimuts ... 22
2.6.7. Neigungsmessung ... 23

Seite

2.7. **Aufnahmeverfahren** ... 23
2.7.1. Triangulation ... 23
2.7.2. Polygonzug ... 24
2.7.3. Polarverfahren ... 26
2.7.4. Orthogonalverfahren ... 27
2.7.5. Einhängen in bekannte Koordinatensysteme ... 27

2.8. **Auswertung** ... 28
2.8.1. Ziel der Auswertung ... 28
2.8.2. Manuelle Auswertung ... 28
2.8.3. Auswertung mit Hilfe der EDV ... 30

2.9. **Auswertung mit dem Aequometer** ... 31
2.9.1. Grundlegendes ... 31
2.9.2. Tabellenblätter ... 32
2.9.3. Aufruf der Funktionen ... 34
2.9.4. Eingabe von Kenndaten und Winkelmaßen ... 34
2.9.5. Eingabeschema ... 34
2.9.6. Expertenmodus ... 35
2.9.7. Berechnungsmodi ... 35
2.9.8. Orthogonalverfahren ... 37
2.9.9. Trigonometrie ... 38
2.9.10. Zeichnung ... 39
2.9.11. Übertragen der Geometrien in ein GIS-System ... 40

2.10. **Berechnungen im Aequometer** ... 42
2.10.1. Eingangsdaten ... 42
2.10.2. Variablen und Konstanten ... 42
2.10.3. Horizontaldistanz ... 43
2.10.4. Orthogonale Koordinatenunterschiede ... 44
2.10.5. Fehlerverteilung ... 44
2.10.6. Koordinatenberechnung ... 46
2.10.7. Schlussvektor ... 47
2.10.8. Koordinaten der Zeichnung ... 48
2.10.9. Fläche ... 49
2.10.10. Umfang oder Länge ... 51
2.10.11. Längenfehler ... 51
2.10.12. Flächenfehler ... 52

Seite

3. **Material und Methoden** ... 56
3.1. **Flächen im Kranzberger Forst** ... 56
3.1.1. Untersuchungsgebiet ... 57
3.1.2. Referenzkoordinaten ... 57
3.1.3. Beschreibung der Flächen und Messverfahren ... 58
3.1.4. Einhängen in das Landeskoordinatennetz ... 60
3.1.5. Auswertung der Messergebnisse ... 60
3.1.6. Flächen ohne Hilfspunkte ... 60
3.1.7. Lagetreue der Punkte ... 61
3.1.8. Längen- und Flächentreue ... 61
3.1.9. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lagetreue ... 61

3.2. **Punkte im Kranzberger Forst** ... 63

3.3. **Flächen in Hohenschäftlarn** ... 64
3.3.1. Untersuchungsgebiet ... 64
3.3.2. Beschreibung der Flächen und Messverfahren ... 65
3.3.3. Einhängen in das Landeskoordinatennetz ... 65
3.3.4. Zeitstudie ... 66
3.3.5. Berechnung der Teilflächen ... 66
3.3.6. Darstellung ... 66

3.4. **Externe Messungen** ... 67
3.4.1. Herkunft der Daten ... 67
3.4.2. Auswertung ... 67
3.4.3. Vergleich der Flächengrößen in „Fläche 1.0“ und Aequometer ... 67

3.5. **Simulierte Flächen** ... 68
3.5.1. Zweck der Simulation ... 68
3.5.2. Erzeugung der Zufallspolygone ... 68
3.5.3. Simulation des Messfehlers ... 69
3.5.4. Vergleich mit realen Messungen ... 70
3.5.5. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue ... 70
3.5.6. Korrelationsanalyse der Fehlerwerte ... 70

3.6. **Simulation in Octave** ... 71
3.6.1. Eingangsparameter ... 71
3.6.2. Ausgabe der Kenngrößen ... 71
3.6.3. Auswertung der berechneten Fehlerwerte ... 72
3.6.4. Einfluss der Messunsicherheiten auf den Flächenfehler ... 73

Seite

4. **Ergebnisse** ... 74
4.1. **Flächen im Kranzberger Forst** ... 74
4.1.1. Berechnung der Fläche und des Umfangs ... 74
4.1.2. Lagetreue der Punkte ... 74
4.1.3. Längen- und Flächentreue ... 76
4.1.4. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lagetreue ... 78

4.2. **Punkte im Kranzberger Forst** ... 79

4.3. **Flächen in Hohenschäftlarn** ... 80
4.3.1. Ergebnis ... 80
4.3.2. Zeitstudie ... 80

4.4. **Externe Daten** ... 81
4.4.1. Lagemaße und Häufigkeitsverteilung ... 81
4.4.2. Vergleich der Flächengrößen „Fläche 1.0“ und Aequometer ... 83

4.5. **Simulierte Flächen** ... 84
4.5.1. Vergleich der simulierten und externen Flächen ... 84
4.5.2. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue ... 87
4.5.3. Auswirkung der Messunsicherheiten auf den Flächenfehler ... 88
4.5.4. Auswertung der Fehlerschätzer ... 89

5. **Diskussion** ... 90
5.1. **Messgeräte und -verfahren** ... 90
5.1.1. Gegenüberstellung der Messgeräte ... 90
5.1.2. Kritische Betrachtung der verwendeten Messverfahren ... 91
5.1.3. Einhängen ins Landeskoordinatennetz ... 93

5.2. **Lage- und Flächenfehler** ... 94
5.2.1. Beurteilung der Lagetreue der Punkte ... 94
5.2.2. Beurteilung der Längen- und Flächentreue ... 94
5.2.3. Vergleich der Ergebnisse mit Hamberger/Zander ... 94

5.3. **Zeitbedarf** ... 96
5.3.1. Wertung der Zeitstudie in Hohenschäftlarn ... 96
5.3.2. Vergleich der Zeitstudie mit den Ergebnissen von Hoffmann und Hamberger ... 96

Seite

5.4. **Externe Daten** ... 97
5.4.1. Ergebnisse ... 97
5.4.2. Vergleich der Flächengrößen „Fläche 1.0“ und Aequometer ... 98

5.5. **Aussagekraft der Ergebnisse der simulierte Flächen** ... 99

5.6. **Vergleich der polaren Aufnahme mit der GPS-Messung** ... 101
5.6.1. Genauigkeit von GPS-Geräten im Vergleich zur polaren Aufnahme ... 101
5.6.2. Vergleich der Ergebnisse mit Hoffmann ... 102
5.6.3. Befragung der QBF ... 104
5.6.4. Zeitbedarf bei der GPS-Messung im Vergleich zur polaren Aufnahme ... 104
5.6.5. Wichtige Vor- und Nachteile beider Verfahren ... 106

6. **Ausblick** ... 107

7. **Verzeichnisse** ... 108
7.1. Literaturverzeichnis ... 108
7.2. Abbildungsverzeichnis ... 111
7.3. Tabellenverzeichnis ... 112
7.4. Formelverzeichnis ... 112
7.5. Übersicht der Notationen ... 113

Abstract ... 116

1. Einleitung

1.1. Vermessung im Forst

Die Vermessung im Wald stellt einen wichtigen Bestandteil forstlicher Betriebsarbeiten und Forschung dar. Es handelt sich hierbei um Aufgaben wie das Einmessen von Punkten und Linien oder die Ermittlung der Größe einer Fläche. Hierfür werden meist optische, trigonometrische Verfahren eingesetzt, wenn auch die Bedeutung satellitengestützter Systeme zunimmt. Die geforderten Genauigkeiten sind im Forst oft geringer als z.B. in der Landes- oder Katastervermessung, was den Einsatz einfacher Messgeräte und -verfahren erlaubt. In der vorliegenden Arbeit werden polare Aufnahmeverfahren untersucht, die von forstlich ausgebildetem Personal mit einfachen Messgeräten wie Handkompass und Fadenmessgerät durchgeführt werden können.

1.2. Ein Werkzeug zur Auswertung

Satellitenempfänger und moderne Vermessungsgeräte speichern die erhobenen Messwerte intern. Diese können später an einen PC überspielt und dort mit der entsprechenden Software ausgewertet werden. Da die zeichnerische und rechnerische Auswertung der Daten von Hand bei der polaren Aufnahme viel Zeit in Anspruch nimmt, ist man hier ebenfalls auf entsprechende Auswertungssoftware angewiesen. Dem Förster sollte ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem sich die gemessenen Daten benutzerfreundlich auswerten lassen. Zu diesem Zweck wurde der Aequometer entwickelt. Die grundlegenden Berechnungen wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Jürgen Zander als Arbeitsmappe für Microsoft Excel umgesetzt. Der Autor hat diese Arbeitsmappe erweitert und verschiedene Programmteile in Microsoft Visual Basic for Applications entwickelt. Das Ergebnis ist eine Software, mit der polar vermessene Geometrien berechnet, dargestellt und gespeichert werden können. Zur Verwaltung und Weiterverarbeitung der Geometrien und den dazugehörigen Sachdaten in GIS[1]-Systemen ist der Datenexport in das Shape Format ESRI (1998) möglich. Verschiedene Softwarelösungen, die unter anderem an den Ämtern für Land- und Forstwirtschaft (ÄLF), den Naturschutzbehörden und Forschungsanstalten vorhanden sind, können diese Daten lesen. Somit wurde eine Schnittstelle zwischen der manuellen Aufnahme und der elektronischen Weiterverarbeitung geschaffen, die lizenzkostenfrei in der Praxis einsetzbar ist.

1 Mit geographischen Informationssystemen (GIS) können „raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden.“ BILL (1994)

1.3. Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die forstliche Vermessung und die Auswertung der erhobenen Daten behandelt. Zunächst werden die Messgeräte und -verfahren beschrieben sowie Fehlerquellen genannt. Des Weiteren wird auf die Aufnahmetechnik eingegangen. Als Werkzeug zur Auswertung wird der Aequometer vorgestellt und dessen Berechnungsverfahren dokumentiert. Dieser Teil stellt die Grundlage für die folgenden Untersuchungen dar.

Im zweiten Teil werden praktisch durchgeführte Messungen und deren Auswertung beschrieben. Anhand verschiedener Aufnahmen werden die Lage- und Flächentreue der Geometrien und der Zeitbedarf für die Messungen ausgewertet. Unter Verwendung von Messprotokollen, die Revierleiter zur Verfügung stellten und einem Programm das Messungen simuliert, wird die Auswirkung der Fehlerverteilung auf Lage- und Flächentreue der Geometrie untersucht. Weiterhin werden verschiedene Möglichkeiten untersucht und miteinander verglichen, Fehler anhand des Messprotokolls einzuschätzen. In der Diskussion werden die Ergebnisse dieser Arbeit kritisch betrachtet und mit anderen Untersuchungen verglichen. Abschließend wird die polare Aufnahme der Messung mit GPS-Geräten gegenübergestellt und wichtige Vor- und Nachteile beider Verfahren genannt.

Alle dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten und Messungen sowie deren Auswertungen und Ergebnisse liegen dieser Diplomarbeit in digitaler Form bei. Die Messungen wurden sowohl als Aequometer-Textdateien als auch als Shapedateien gespeichert, um einerseits ein einfaches Nachvollziehen der Aufnahme und andererseits ein komfortables Darstellen der Geometrien zu ermöglichen. Weiterhin sind der Aequometer 3.4 mit Beispieldateien und das Octave-Programm zur Simulation von Messungen beigefügt.

2. Vermessung und Auswertung

2.1. Hilfsmittel

2.1.1. Fluchtstab

Das wichtigste Hilfsmittel zur temporären Vermarkung von Punkten ist der Fluchtstab, auch Fluchtstange oder Bake genannt. Diese 1,5 m bis 2,5 m langen Stäbe aus widerstandsfähigem, lackiertem Holz oder Metall haben typischerweise eine Stärke von 28 mm und besitzen eine verstärkte Spitze. Sie sind alle 50 cm abwechselnd rot und weiß gefärbt und daher auch aus der Ferne noch gut zu erkennen.

2.1.2. Schnurlot

Das Schnurlot ist ein an einer Schnur befestigtes Gewicht mit einer zentrischen Spitze, die in Verlängerung der Schnur nach unten zeigt. Es findet z.B. beim Zentrieren von Geräten, beim Senkrechtstellen von Fluchstäben oder beim Verlängern von Geraden Anwendung. Das Pendeln des Lotes lässt sich durch mehrmaliges, kurzes Auf-und-Ab-Bewegen der Schnur verringern. Durch starken oder böigen Wind wird die Verwendbarkeit des Schnurlotes beeinträchtigt.

2.1.3. Winkelprisma

Zum Errichten von Loten auf einer Strecke ist das Winkelprisma von großem Wert. Zweckmäßig ist ein fünfseitiges Doppelprisma, das in Kombination mit einem Schnurlot verwendet wird. Der Strahlengang wird in den Prismen durch Brechung und Reflexion im rechten Winkel nach links und rechts abgelenkt und außerdem ist ein Schlitz mit direktem Durchblick vorhanden. Das Prisma wird frei in der Hand gehalten, wobei das Schnurlot den Messpunkt markiert. Bei der Arbeit mit dem Winkelprisma ist die senkrechte Aufstellung der Fluchtstäbe besonders wichtig. Dreiseitige Prismen, Spiegel- und Diopterinstrumente sind historisch und spielen in der Praxis keine Rolle mehr.

„Die Schliffehler der Prismen liegen unter 2 cgon. Zu dem Fehler des Schliffs kommen bei freihändigem Gebrauch ein Zielfehler von 3 bis 4 cgon und ein Zentrierfehler von 2 cm, so dass beim Abstecken eines 30 m langen Lotes mit einem Pentagon eine Standardabweichung von 2 – 3 cm erwartet werden kann.“ KAHMEN (1997).

2.2. Streckenmessung

Die Länge der gemessenen Vektoren wird mit mechanischen oder elektronischen Messgeräten in der SI-Einheit Meter[2] bestimmt. Auf die optische Streckenmessung wird in dieser Arbeit aufgrund der höheren gerätetechnischen und personellen Anforderungen nicht eingegangen.

2.2.1. Messband

Das gebräuchlichste Instrument zur Streckenmessung ist das Messband, auch Bandmaß genannt, in der Ausführung als Rollmessband. Dies ist zumeist aus nichtrostendem Stahl und oft zum Schutz vor Witterungseinflüssen mit Kunststoff ummantelt. Präzisionsmessbänder findet man auch aus anderen Legierungen, die einen geringeren Längenausdehnungskoeffizienten aufweisen. Für Messungen an Strom führenden Leitungen und Gleisanlagen sind elektrisch nicht leitende oder isolierte Bänder zu verwenden (vgl. MATTHEWS (1993), SCHÜTZE (2001), FRÖHLICH (1993)). „Leinenbandmaße […] sind für Aufmaße im Freien wegen der hohen Ungenauigkeit und des starken Verschleißes ungeeignet“ LEHR (1979).

„Stahlmessbänder sind einheitlich für eine Temperatur von 20° C und einen Zug von 50 N ausgelegt und haben unter diesen Bedingungen eine Genauigkeit von ±1 mm auf 10 m“, schreibt OSTERLOH (1998) zur erreichbaren Messgenauigkeit. PRASUHN (1995) gibt an: „Mit Stahlmessbändern lassen sich Genauigkeiten von 2 – 3 cm auf 100 m erreichen“. Auf die bei Präzisionsmessungen übliche Temperaturkorrektur kann in der forstlichen Vermessung im Allgemeinen verzichtet werden. Diese wirkt sich bei 10 K Unterschied um 12 mm pro 100 m aus.

Fehler beim Messen mit dem Bandmaß entstehen beispielsweise durch falsches Anhalten (Nullpunktfehler), durch zu geringe Spannung, der Vernachlässigung des Durchhangs bei schwebender Messung, durch Messung bei Wind oder durch Abweichung aus der Flucht. „Beim Messen darf das Band nicht verdreht sein, Knicke oder Schlingen bilden“ FRÖHLICH (1993). Messbänder sind nach Gebrauch stets zu reinigen

2.2.2. Fadenmessgerät

Ein für Messung im Ein-Mann-Verfahren besonders günstiges Instrument ist das Fadenmessgerät. Mit diesem wird ein Baumwollfaden entlang der Messstrecke ausgezogen. Im Gerät ist dieser Faden nach einer Bremse mehrmals um eine Messrolle mit definiertem Umfang gewickelt. Die Anzeige der Rollenabwicklung erfolgt über ein mechanisches oder elektronisches

2 1 Meter (m) ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum während einer Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.

Zählwerk. Der Faden verrottet schnell, ist für Wild und Kinder ungefährlich und kann daher gefahrlos im Gelände verbleiben, wenn dadurch das ästhetische Empfinden z.B. von Spaziergängern nicht gestört wird.

Der Gerätefehler des Fadenmessgerätes „Fieldranger“, das in dieser Diplomarbeit zur Messung verwendet wurde, wird vom Hersteller PORCUPINE CANVAS INC mit weniger als 0,5 % angegeben, wie aus der Beschreibung hervorgeht: „On our measured 100 meter course (300+ ft.) we will not accept a machine that reads more than .2 meters error (8 in.) We advertise accuracy better than .5 % but our standards are closer than that and we usually hit the marks right on.” Die Firma HAGLÖF SWEDEN gibt die Messgenauigkeit Ihres Fadenmessgerätes „Walktax“ mit 0,2 % an, was maximal 20 cm auf 100 m entspricht.

Die interne Gerätegenauigkeit kann durch unsachgerechtes Einlegen des Messfandens oder Verunreinigungen und Fremdkörper innerhalb des Geräts beeinträchtigt werden. Das Gerät ist daher nur in einem ordnungsgemäßen Betriebszustand zu verwenden. Zu schnelles oder ungleichmäßiges Ausziehen des Messfadens kann Messfehler verursachen. Zusätzliche Abweichungen entstehen bei starkem Wind durch den Durchhang des Messfadens. Ein Einhängen des Messfadens in der Vegetation ist hier hilfreich, allerdings darf der Faden nicht im Zickzack verlaufen.

2.2.3. Elektronische Distanzmessgeräte

„Bei der elektronischen Streckenmessung wird die Entfernung aus der Laufzeit einer sich mit konstanter Geschwindigkeit fortpflanzenden Welle, bzw. Wellengruppe abgeleitet. Ein im Anfangspunkt der Strecke aufgestellter Sender sendet die Welle, bzw. Wellengruppe zu einem Reflektor [oder Transponder, Anm. d. Verf.], der sie reflektiert und zum Anfangspunkt leitet“ HENNECKE (1988). In der forstlichen Praxis werden vor allem zwei elektronische Gerätetypen eingesetzt: Ultraschall- und Laserentfernungsmesser.

Hochwertige **Ultraschall-Entfernungsmesser** arbeiten mit einem aktiven Transponder der das ausgesendete Schallsignal beantwortet. Dies macht das Gerät unempfindlich gegenüber Nebenechos, die das Messergebnis aufgrund des relativ breiten Schallkegels erheblich verfälschen könnten. Ultraschall-Entfernungsmessgeräte, die ohne aktiven Transponder arbeiten, erfordern ein freies Umfeld im Bereich des Messkegels und sind daher für den Einsatz in der forstlichen Vermessung nicht tauglich. Trotz des Transponders ist diese Geräteklasse nicht unempfindlich gegenüber Störgeräuschen, die im Frequenzbereich der Messung liegen. Mehrmaliges Messen ist daher empfehlenswert. Der Messbereich von Ultraschallmessgeräten ist, je nach Hersteller, auf ca. 15 m bis 35 m begrenzt. Vor Beginn der Messungen ist stets eine Gerätekalibrierung durchzuführen, auch wenn hochwertige Geräte selbst eine Temperaturkorrektur vornehmen. Die Genauigkeit von Ultraschall-Entfernungsmessern schwankt je nach Gerätetyp stark. Der Hersteller des in dieser Diplomarbeit verwendeten Messgerätes HAGLÖF

(2002 und 2003) gibt die Genauigkeiten der Messgeräte „DME“ und „Vertex III“ mit 1 % oder besser an, wenn das Gerät exakt kalibriert ist.

Laser-Entfernungsmesser können noch genauer arbeiten. Ein vom Gerät ausgesendeter Laserstrahl wird von einem Reflektor zurückgeworfen und die Entfernung aus der Laufzeit bestimmt. Es sind auch reflektorlos arbeitende Systeme erhältlich, die den Vorteil geringerer Laufwege bei der Messung mit sich bringen. Dieser Vorteil wird jedoch durch eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit erkauft. Bei hoher Luftfeuchtigkeit, Nebel oder Regen kann das Messergebnis durch Reflexionen an Wassertröpfchen in der Luft unbrauchbar gemacht werden. Messungen mit Laser-Entfernungsmessern erfordern stets freie Sicht auf der gesamten Messstrecke. Die Reichweiten und Genauigkeiten von beispielhaft ausgewählten, hochwertigen Laser-Entfernungsmessern sind in Tabelle 2-1 angegeben. Die Reichweiten können durch den Einsatz von Prismen noch vergrößert werden.

Tabelle 2-1 Reichweiten und Genauigkeiten von Laserdistanzmessgeräten, nach Herstellerangaben

Hersteller / Gerät	Reichweite	Typische Genauigkeit
Leica Disto™ A3	0,05 m – 100 m	± 3 mm
Leica Disto™ A5	0,05 m – 200 m	± 2 mm
Leica Disto™ Plus	0,2 m – 200 m	± 1,5 mm
Nikon Laser 400	10 m – 400 m	± 0,5 m bis 100 m, ± 1 m ab 100 m
Nikon Laser 800 S	10 m – 730 m	± 0,5 m bis 370 m

2.2.4. Ungebräuchliche Distanzmessgeräte

Messräder (Rolltachos) sind im Forst kaum gebräuchlich, da ein ebener, fester Untergrund Voraussetzung für die genaue Messung ist. Messlatten haben wegen Ihrer Unhandlichkeit kaum noch eine Bedeutung. Auch Feldzirkel sind in der forstlichen Praxis heute kaum mehr anzutreffen und Teleskopmaßstäbe, Taschenbandmaße oder Zollstöcke finden in der forstlichen Lagemessung keine Anwendung. Auf diese Messgeräte wird daher nicht näher eingegangen. Das Schrittmaß ist ein Schätzverfahren für Strecken, keine echte Messung. In den meisten Fällen genügt dies den Genauigkeitsanforderungen nicht.

2.3. Messung des Azimuts

2.3.1. Einheiten

Die abgeleitete SI-Einheit für ebene Winkel im Bogenmaß ist der Radiant mit dem Einheitszeichen rad, engl.: radiant BIPM (2006). Tabellenkalkulationsprogramme wie z.B. Microsoft Excel rechnen mit dieser Einheit.

Instrumente zur Winkelmessung gibt es mit verschiedenen Skalenteilungen. In der Schiff- und Luftfahrt wird der Vollkreis in 360 gleiche Teile eingeteilt (Sexagesimalteilung, früher Altgrad). Diese Einheit wird durch einen hochgestellten Kreis gekennzeichnet und als Grad, engl.: degree bezeichnet. Bruchteile dieser Einheit können sexagesimal (51° 14’ 4’’), dezimal (51,2345°) oder kombiniert (51° 14’ 4,2’’) angegeben werden.

Im Vermessungswesen teilt man den Vollkreis in 400 gleiche Teile (Zentesimalteilung, früher Neugrad), um eine einfacher handhabbare, anschauliche, dezimale Einheit zu bekommen. Ein Teil wird als 1 Gon engl.: gradian, bezeichnet und mit gon als Einheitenzeichen gekennzeichnet. „Die Schreibweisen »Neugrad« oder »1^{g}; 1^{c}; 1^{cc}« werden nicht verwendet.“ PRAESUHN (1995).

Auf nautischen Kompassen ist gelegentlich die Einheit Strich zu finden, wobei der Vollkreis 32 gleiche Teile hat. In der Artillerie gibt es außerdem die Einheit mil, was einer Einteilung des Vollkreises in 6000 oder mehr Teile entspricht. Diese beiden Einheiten haben in der forstlichen Vermessung keine Bedeutung.

2.3.2. Messgeräte

Grundsätzlich können Winkelmessgeräte in optische und magnetische Geräte unterteilt werden. Optische Winkelmessgeräte finden dort Anwendung, wo höchste Präzision gefordert ist. Heute kommen für solche Aufgaben meist elektronische Tachymeter zu Einsatz, mit denen ein schnelles und exaktes Erfassen vieler Messpunkte möglich ist. Diese Geräteklasse ist jedoch sehr teuer und erfordert in der Bedienung geschultes Personal. Rein mechanische, optische Geräte kommen nur noch in Ausnahmefällen zum Einsatz. Aus diesen Gründen wird auf die optische Winkelmessung nicht näher eingegangen.

Magnetische Kompasse haben eine Kompassnadel, die sich tangential entlang den Feldlinien des Erdmagnetfeldes ausrichtet. Bei hochwertigen Kompassen, und nur solche kommen für vermessungstechnische Zwecke in Frage, ist die Kompassnadel reibungsarm gelagert und flüssigkeitsgedämpft. Oft verfügen derartige Kompasse über eine Libelle[3] zur Horizontierung und eine Peileinrichtung. Die Ablesegenauigkeit eines solchen Gerätes liegt typischerweise bei ±0,5°.

Linealkompasse sind aufgrund der fehlenden Peilvorrichtung in der Vermessung nicht einsetzbar. Dieser Kompasstyp ist für die Arbeit mit Karten konzipiert. Spiegelkompasse verfügen über einen kippbaren Spiegel zum Ablesen der Peilung. Meist haben sie einen durchsichtigen Gehäuseboden, um die Arbeit mit Karten zu ermöglichen.

---

[3] Ein flüssigkeitsgefüllter, durchsichtiger Hohlkörper, der durch die Positionierung einer eingeschlossenen Gasblase zwischen Markierungen die horizontale Ausrichtung anzeigt.

Präzises Messen ist mit Peilkompassen möglich, die mit einer drehbar gelagerten Skala als Kompassnadel und einem Prisma oder Linsensystem zur Ablesung ausgerüstet sind. Es gibt auch Modelle, bei denen ein Laser das Peilen erleichtert (z.B. der „Laser Master“ von Silva). In der forstlichen Vermessung findet meist dieser Gerätetyp Anwendung.

2.3.3. Kompassfehler

Magnetkompasse sind aufgrund ihres Funktionsprinzips anfällig gegenüber ferromagnetischen Körpern in ihrem Einflussbereich. Bei der Messung ist also ein ausreichender Abstand zu metallischen Gegenständen wie Kraftfahrzeugen, Hochspannungsmasten, Zäunen, Stahlbeton oder elektrischen Geräten einzuhalten. Auch eine Stahlbrille oder eine Halskette kann eine Ablenkung der Nadel hervorrufen. Auch „magnetisch wirksame Gesteine im Boden (Eisenerz, Basalt)“ LINKE (2000) wirken sich störend aus. Derartige Fehler werden als Ablenkung oder **Deviation** bezeichnet.

Da die Magnetfeldlinien der Erde auf den magnetischen Nordpol weisen, und örtlichen sowie zeitlichen Schwankungen unterlegen sind, zeigt ein Kompass nicht genau auf den geographischen Nordpol. Die horizontale Abweichung zwischen magnetischer Nordrichtung und geographischer Nordrichtung wird als Missweisung oder **Deklination** bezeichnet. Sie ist in Mitteleuropa derzeit nahe null und kann daher meist vernachlässigt werden.

Durch die Krümmung der Erdoberfläche sind die Gitternetzlinien in Nord-Süd Richtung (Meridiane) nicht parallel, sondern laufen an den Polen zusammen. Man sagt: Sie konvergieren. Die Nordrichtungen verschiedener Punkte auf der Erdoberfläche sind daher nicht parallel. Diese Abweichung wird als **Meridiankonvergenz** bezeichnet.

Die Summe aus Deklination und Meridiankonvergenz wird als **Nadelabweichung** bezeichnet. Auf topographischen Karten aus Deutschland sind am Rand Informationen zu Nadelabweichung und Meridiankonvergenz aufgedruckt. Es gibt auch besondere Karten, auf denen Linien gleicher Deklination (Isogone) eingezeichnet sind. Zu beachten ist, dass diese zeitlichen Veränderungen unterliegen. Die Nadelabweichung kann korrigiert werden durch entsprechendes Verdrehen der Kompassskala oder durch rechnerisches Anpassen der abgelesenen Werte.

Abbildung 2.3-1 nach GRUBER (2001) verdeutlicht die Nordrichtungen an einem Standpunkt westlich des Meridians.

GgN = Geographisch Nord,
die nördliche Richtung des Meridians durch einen Punkt.

GiN = Gitter Nord,
die nördliche Richtung der durch einen Punkt verlaufenden Parallelen zum Bild des Bezugsmeridians.

MN = Magnetisch Nord,
die nördliche Richtung der durch einen Punkt verlaufenden horizontalen Projektion der magnetischen Feldlinien.

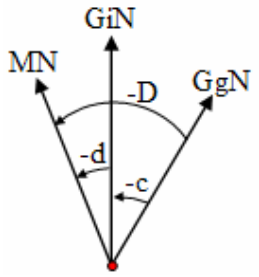


Abbildung 2.3-1
Horizontale Bezugsrichtungen

Deklination **D**, Nadelabweichung **d**, Meridiankonvergenz **c**

Hinzu kommt, dass die Magnetfeldlinien nicht oberflächenparallel verlaufen, sondern örtlich mehr oder weniger geneigt. Der Winkel der Magnetfeldlinien zur Horizontalen wird als **Inklination** bezeichnet. Hersteller gleichen dies aus, indem sie den Schwerpunkt der Kompassnadel verlagern. Ein solcher Kompass kann jedoch nur in einer bestimmten Zone verwendet werden. Nahe den Polen stehen die Magnetfeldlinien annähernd senkrecht, was die Messung mit einem konventionellen Kompass unmöglich macht.

Ein weiterer, häufiger Fehler wird durch falsche Handhabung des Kompasses hervorgerufen. Wird dieser nämlich nicht waagrecht gehalten, so schleift die Kompassnadel am Gehäuse, was die freie Drehung verhindert und somit zu einer fehlerhaften Anzeige führt. Man spricht vom **Verkanten**. Dieser Fehler kann vermieden werden, indem man sich vor der Ablesung durch leichte Drehung des Gerätes versichert, dass die Nadel sich frei einspielen kann.

LINKE (2000) nennt noch eine weitere Fehlerquelle, die durch elektrostatische Aufladung des Messgeräts entsteht. Dies äußert sich im „Festkleben“ der Nadel am Boden der Dose, obwohl der Kompass waagrecht gehalten wird. Die **Reibungselektrizität** kann durch Anhauchen oder Abwischen des Gerätes mit einem feuchten Tuch beseitigt werden. Der **Kompassdrehfehler** wird durch die Bewegung eines Schiffes, eines Luft- oder Kraftfahrzeuges verursacht und spielt in der forstlichen Vermessung keine Rolle.

2.4. Neigungsmessung

2.4.1. Messgeräte

Zur Messung der Geländeneigung bedient man sich eines Neigungsmessers (HAGEBUSCH (1981), FRÖHLICH (1993) u.a.), von OSTERLOH (1998) auch Gefällemesser genannt. Diese Geräte besitzen ein frei schwingendes, oft gedämpftes Lotpendel, das auf einer Skala den entsprechenden Neigungswinkel anzeigt. Weiterhin sind auch elektronische Geräte mit hoher Präzision verfügbar. Empfehlenswert sind Geräte die über eine Zielvorrichtung verfügen, da diese eine präzise Messung zulassen. Einfache Neigungsmesser, die oft in Kombination mit einem Kompass zu finden sind, sind für genaue Messungen nur bedingt geeignet.

2.4.2. Skalenteilung

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Skalenteilung des verwendeten Gerätes zu richten. Im Regelfall wird der Winkel zur Waagrechten angegeben, hier „Azimutalwinkel“ genannt. Weitere Bezeichnungen sind: Böschungswinkel LEHR (1979) und Höhenwinkel PRASUHN (1995). Der Winkel zur Senkrechten wird im Folgenden als „Zenitalwinkel“ bezeichnet. Diese Winkel können entweder in Grad oder in Gon angegeben werden. Weiterhin ist die Anzeige als Neigungsprozent verbreitet. Dieses definiert sich durch als das Verhältnis der vertikalen Entfernung, auch bezeichnet als „Höhe“ zur horizontalen Entfernung „Horizontaldistanz“. In der Literatur wird dieses Verhältnis auch in der Form 1:x angegeben. Manche Neigungsmesser verfügen zusätzlich über eine Skala, an der ein Reduktionsfaktor angezeigt wird. Multipliziert man diesen mit der gemessenen Strecke, so erhält man die Horizontaldistanz. Spezielle Neigungsmesser werden im Forst auch zur Höhenmessung verwendet und besitzen hierfür weitere Skalen.

2.4.3. Messfehler

Fehler ergeben sich bei der Neigungsmessung meist aus unsachgerechter Bedienung des Messgerätes, falscher Peilung oder inkorrekter Ablesung. Diese groben Fehler lassen sich durch eine Abschätzung der Plausibilität des ermittelten Messwertes weitgehend vermeiden. Mit hochwertigen Neigungsmessern, wie sie z.B. von den Firmen Silva und Suunto angeboten werden, wird bei ordnungsgemäßer Messung typischerweise eine Messgenauigkeit von ±1° erzielt. Diese kann durch Präzisionsmessung noch erheblich verbessert werden.

2.5. Koordinatensysteme

Bei der polaren Aufnahme misst man die Richtung gegen Nord, den Abstand der Punkte und, so vorhanden, die Geländeneigung. Das Ergebnis sind dreidimensionale Polarkoordinaten (Kugelkoordinaten). Da das Koordinatensystem seinen Ursprung im Ausgangspunkt der Messung hat, wird es „lokal“ genannt. Zur zeichnerischen Auswertung ist diese Form günstig, da die Winkel und Strecken unter Berücksichtigung des Maßstabs und der Streckenreduktion (siehe 2.10.3) direkt auf Papier übertragen werden können.

Bei der Auswertung am Computer und zur einfacheren Flächenberechnung werden diese Koordinaten umgerechnet in x-Koordinaten auf der Hochachse (Abszisse) und y-Koordinaten auf der Rechtsachse (Ordinate) eines zweidimensionalen, kartesischen[4] Koordinatensystems.

Ist die Position der aufgenommenen Geometrien in einem gegebenen nationalen oder globalen Koordinatensystem interessant, so müssen die Koordinaten in dieses übertragen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Koordinaten des Startpunktes der Messung (Einhängepunkt) im gewünschten System bekannt sind. In Deutschland ist seit 1927 das vom Mathematiker Carl-Friedrich Gauß (1777 -1855*)* stammende und von dem Geodäten Johann Heinrich Louis Krüger (1857 -1923) weiterentwickelte Gauß-Krüger-System in Gebrauch (SCHÜTZE (2001) und PRASUHN (1995)). Da es sich um ein metrisches, orthogonales Koordinatensystem handelt, ist die Übertragung der lokalen Koordinaten in das Gauß-Krüger System mit hinreichender Genauigkeit durch Addition der Startpunktkoordinaten zu jedem Punkt der aufgenommenen Geometrie möglich. Bei der Präzisionsvermessung wäre eine Strecken- und Höhenkorrektur erforderlich. Die sich ergebenden Differenzen sind jedoch bei den verhältnismäßig geringen Größen der im Forst aufgenommenen Geometrien vernachlässigbar klein und werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Ist die Angabe der Koordinaten in einem anderen Koordinatensystem gefordert, beispielsweise in dem u.a. von GPS-Empfängern genutzten World Geodetic System 1984 (WGS84), so müssen diese umgerechnet werden. Die Umrechnung erfordert einen Wechsel des Bezugssystems vom Bessel Ellipsoid mit Potsdam Datum in das WGS84 Ellipsoid und ist daher nicht trivial. Mit Hilfe der EDV lassen sich solche Umwandlungen jedoch problemlos durchführen, wenn die notwendigen, lokal verschiedenen Transformationsparameter bekannt sind (vgl.: 2.9.2). Diese können von den Landesvermessungsämtern bezogen oder berechnet werden, wenn Punkte in beiden Koordinatensystemen bekannt sind.

[4] Orthogonale Koordinatensysteme deren Achsen gleich unterteilt sind, werden kartesisch genannt.

2.6. Aufnahmetechnik

2.6.1. Grundlegende Arbeiten

Bei unübersichtlichen Geländeverhältnissen ist das Aufsuchen und Vermarken der aufzunehmenden Punkte vor der Messung ratsam. Bei komplexen Aufnahmen empfiehlt es sich außerdem, eine Skizze anzulegen, auch Feldriss genannt. Aus dieser ist das gewählte Aufnahmeverfahren ersichtlich und die Messergebnisse können darin eingetragen werden. Bei überschaubaren Aufnahmen ist es dagegen sinnvoll, eine dem Aufnahmeverfahren gerechte Messwerttabelle zu verwenden. Diese ermöglicht eine unkomplizierte Auswertung am Computer. Soll die Aufnahme mit dem Polarverfahren durchgeführt werden, muss der günstigste Instrumentenstandpunkt festgelegt werden. Für das Orthogonalverfahren müssen die Basislinie festgelegt und ausgefluchtet und Hilfslinien abgesetzt werden. Soll die Geometrie in ein vorhandenes Koordinatensystem eingehängt werden, so müssen bekannte Punkte, meist Grenzsteine, aufgesucht und zweifelsfrei identifiziert werden. Jede Messung ist sorgfältig zu planen, um potentielle Fehlerquellen zu vermeiden.

2.6.2. Umgang mit dem Fluchtstab

Zum Aufstellen eines Fluchtstabes in weichem Boden wird dieser mehrmals gerade von oben in das gleiche Loch an der gewünschten Stelle gestoßen. Dieses wird nach Bedarf durch kreisende Bewegungen erweitert. So kann ein fester und lotrechter Stand erreicht werden. Ein bloßes Hineindrücken des Stabes in den Boden führt auch bei großem Kraftaufwand nicht zum gewünschten Ergebnis. Auf harten oder gefrorenen Böden werden Stative verwendet. Mit etwas Übung gelingt das lotrechte Aufstellen des Fluchtstabes nach Augenmaß mit ausreichender Genauigkeit. Ist hohe Präzision gefordert, so wird der lotrechte Stand mit Hilfe eines Lattenrichters mit Libelle oder eines Schnurlotes überprüft und erforderlichenfalls korrigiert.

2.6.3. Abstecken von Geraden, Fluchten

Das Abstecken von Geraden stellt eine der Grundtechniken der Vermessung dar und wird für verschiedene Aufnahmeverfahren gebraucht. Unter Fluchten versteht man das Auffinden von weiteren Punkten auf einer Geraden. Diese ist durch mindestens zwei Punkte gegeben, die meist durch Fluchtstäbe markiert sind. Im einfachsten Verfahren wird das Fluchten von zwei Personen durchgeführt, wobei die fluchtende Person hinter einem der Endpunkte steht und über die bekannten Punkte visiert. Die zweite Person hält einen Fluchtstab in der gewünschten Entfernung locker zwischen Daumen und Zeigefinger, so dass dieser sich lotrecht einpendelt. Auf Zuruf oder Handzeichen des Fluchtenden, wird der Fluchtstab in die Gerade gebracht und gesetzt. Einer einzelnen Person ist das Selbsteinfluchten mit Hilfe eines Winkel-

prismas möglich. Das Verlängern einer Strecke über die gegebenen Endpunkte hinaus wird ebenfalls von einer einzelnen Person durchgeführt. Sind die gegebenen Endpunkte beispielsweise wegen des Geländereliefs gegenseitig nicht einsehbar, so wird in mehreren Arbeitsschritten mit zwei Fluchtstäben aus der Mitte gefluchtet. Der Schnittpunkt zweier gegebener Geraden wird am besten mit drei Personen bestimmt, wobei zwei Personen je eine Gerade fluchten und den Dritten am Zielpunkt abwechselnd einweisen.

Sichthindernisse wie z.B. Gebäude können durch seitlich versetztes Messen umgangen werden. Hierzu werden auf der gegebenen Geraden vor und nach dem Hindernis rechte Winkel abgesetzt. Die zu ermittelnde Strecke wird dann auf einer im Regelfall parallelen Hilfsgeraden gemessen. Zur Sicherung der Messung sind diese Hilfsgeraden zu verlängern und der korrekte Abstand zur gegebenen Geraden zu überprüfen.

Zur Bestimmung der Länge einer nicht begehbaren Strecke (z.B. Flussbreite) kann eine Hilfskonstruktion aus rechtwinkligen Dreiecken verwendet werden.

Abbildung 2.6-1 verdeutlicht, wie dies gemeint ist:
Um die Strecke $\overline{AB}$ zu erhalten, konstruiert man zunächst die senkrecht zu $\overline{AB}$ stehende Hilfsgerade $\overline{AC}$. Diese wird in Flucht um ihre eigene Länge verlängert um den Punkt D zu finden. Von diesem Punkt aus wird nun das Lot auf die Gerade $\overline{AD}$ gefällt. Der Punkt E ergibt sich durch Verlängern der Flucht $\overline{BC}$ auf das eben gefällte Lot. Die konstruierte Strecke $\overline{DE}$ entspricht der gesuchten Strecke $\overline{AB}$.

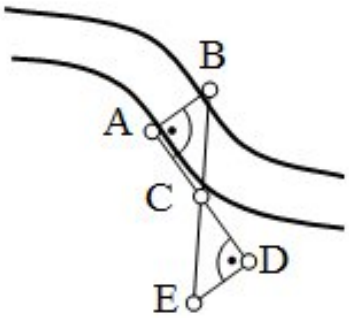


Abbildung 2.6-1 Flussbreite

Zur Genauigkeit beim Ausfluchten von Geraden schreibt KAHMEN (1997): „Ein gewandter Beobachter kann Geraden bis etwa 200 m mit bloßem Auge ausfluchten […]. Bei sorgfältiger Arbeit gelingt es so, in ebenem Gelände die Zwischenpunkte auf 2 - 3 Stabdicken in die Gerade zu bringen. Wird größere Genauigkeit verlangt […], ist ein Theodolit erforderlich.“

2.6.4. Absetzen rechter Winkel

Die gebräuchlichste Methode zum Absetzen rechter Winkel in der forstlichen Vermessung ist die Konstruktion eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Seitenlängen des pythagoreischen Tripels 3, 4, 5 oder Vielfachen davon.

Alternativ kann auch ein gleichschenkliges Dreieck konstruiert werden, dessen Basis auf der ursprünglichen Gerade liegt. Die Mittelsenkrechte der Basis verläuft durch die Spitze und bildet das gesuchte Lot. Die Schenkel sollten länger als die Basis gewählt werden. Diese Verfah-

ren können einfach und mit guter Genauigkeit durchgeführt werden. Vorteilhaft ist, dass ausschließlich Strecken gemessen werden müssen.

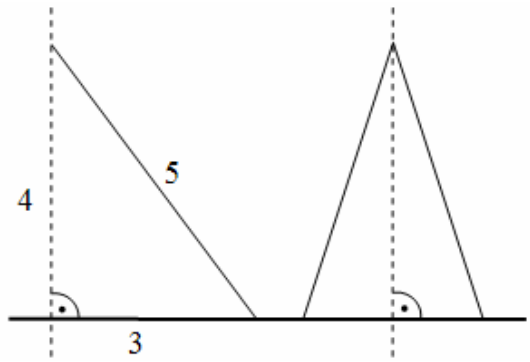


Abbildung 2.6-2 Konstruktion rechter Winkel durch Dreiecke

Die Arbeit mit dem Winkelprisma erfordert etwas Übung, bietet sich aber an, wenn viele Lote zu fällen sind oder höhere Genauigkeitsansprüche gestellt werden. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass die Prismen horizontal liegen, die Fluchtstäbe also senkrecht im Prisma zu sehen sind. Sind die beiden seitlichen Fluchtstäbe, die die Grundlinie definieren, genau übereinander zu sehen, steht der Messende auf der Grundlinie. Der Blick durch den Sehschlitz erlaubt dann eine Peilung entlang der Senkrechten. Zum Abstecken eines rechten Winkels mit Hilfe eines Winkelprismas sind zwei Personen erforderlich. Das Fällen eines Lotes von einem gegebenen Punkt auf die Grundlinie wird von einer Person durchgeführt.

2.6.5. Streckenmessung

Die Messung der Strecke erfolgt parallel zum Relief und wird als „Schrägdistanz“ bezeichnet. Später wird diese unter Einbeziehung des Neigungswinkels zur verebneten Darstellung in der Karte rechnerisch zur Horizontaldistanz reduziert (vgl. 2.10.3.). Die Alternative dazu ist das Staffelverfahren, bei dem die Horizontaldistanz direkt gemessen wird. Dieses Verfahren, das u.a. bei KAHMEN (1997), PRASUHN (1995) und BAUMANN (1999) Erwähnung findet, bleibt wegen des ungleich höheren Aufwandes unbehandelt. Zur temporären Markierung von Messpunkten werden Zählnadeln verwendet, die in den Boden gesteckt werden. Dies wird z.B. bei Messungen benötigt, die über eine Bandlänge hinausgehen.

2.6.6. Messung des Azimuts

Winkel können indirekt durch die Messung der Länge von allen drei Schenkeln eines Dreiecks bestimmt werden. Im Allgemeinen bedient man sich jedoch eines optischen oder magnetischen Winkelmessgerätes. Wegen des relativ hohen messtechnischen Aufwandes von opti-

schen Winkelmessgeräten wird auf die Messung mit dem Theodoliten oder ähnlichen Instrumenten hier nicht speziell eingegangen.

Mit magnetischen Instrumenten werden alle horizontalen Winkel als Azimut, also der Richtung gegen Nord bestimmt. Die Richtungswinkel können direkt abgelesen werden, die Innenwinkel der Figur werden nicht erhoben. Bei der Messung auftretende Winkelfehler können daher nicht rechnerisch überprüft werden. Aus diesem Grund ist die Winkelmessung besonders gewissenhaft durchzuführen, um innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs zu bleiben.

2.6.7. Neigungsmessung

Die Peilung muss hangparallel erfolgen. Dies wird erreicht, indem das Messgerät in einer bestimmten Höhe an einem Fluchtstab angehalten wird und die Peilung auf einen Fluchtstab am Zielpunkt in der gleichen Höhe erfolgt. Zum Zeitpunkt der Ablesung muss das Pendel frei schwingen. Die Messung kann frei Hand mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden, für Präzisionsmessungen ist ein Stativ zu verwenden.

2.7. Aufnahmeverfahren

Vermessungstechnische Aufgaben in der forstlichen Praxis sollen in angemessener Zeit und mit akzeptabler Genauigkeit durchgeführt werden können. Abhängig von weiteren Faktoren wie Anzahl und Lage der Punkte, den Geländeverhältnissen, dem Zweck der Messung und der weiteren Verwendung der Daten sind verschiedene Aufnahmeverfahren geeignet. Bei umfangreicheren Aufnahmen ist es oft notwendig mehrere Verfahren miteinander zu kombinieren, um zum besten Ergebnis zu gelangen. Im Folgenden werden nur Verfahren zur Lageaufnahme berücksichtigt, die mit einfachen Geräten von einer forstlich ausgebildeten Person durchgeführt werden können.

2.7.1. Triangulation

Die einfachste Form der Lageaufnahme ist die Dreiecksmessung (Triangulation). Hierbei wird ein Netz von Dreiecken über die zu messenden Punkte gelegt und die Abstände der Punkte aller solchen Dreiecke bestimmt. Es sollten noch zusätzliche Geraden erfasst werden um Kontrollmaße zu erhalten. Da ein Dreieck durch die Länge seiner Seiten eindeutig definiert ist, lässt sich die Lage aller Punkte berechnen. Für den Anschluss an ein bestehendes Koordinatensystem sind zwei bekannte Punkte oder ein bekannter Punkt und eine bekannte Richtung notwendig. Die Anfertigung einer Messskizze, in der alle Dreiecke mit Bemaßung eingezeichnet werden, ist für die spätere Auswertung unerlässlich.

Das Verfahren besticht durch die einfache Durchführbarkeit. Da keine Winkel erhoben werden müssen, ist nur eine Minimalausstattung an Messgeräten erforderlich und die möglichen Fehlerquellen sind stark eingeschränkt. Die reine Triangulation findet vor allem bei weniger umfangreichen Messungen Anwendung. In Kombination mit anderen Messverfahren, bei denen keine rechnerische Kontrolle möglich ist, dient die Dreiecksmessung zum Sichern wichtiger Messpunkte mittels zusätzlich gemessener Strecken.

Das **Einbindeverfahren**, bei dem die zu messende Linie (z.B. eine Gebäudekante) auf eine oder mehrere bekannte Grundlinien verlängert wird, kann als ein Sonderfall der Triangulation angesehen werden. Die resultierenden Schnittpunkte werden vermarkt und die Strecken gemessen. Die Koordinaten der gesuchten Punkte können so aus drei bekannten Seitenlängen und einem bekannten Punkt errechnet werden. Das Einbinden kommt dann zum Einsatz, wenn bereits ein Netz von Messlinien existiert und weitere Fluchten in die Vermessung aufgenommen werden. Das Einbindeverfahren stellt daher eine Ergänzung anderer Messverfahren dar.

2.7.2. Polygonzug

Das im Forst am häufigsten eingesetzte Aufnahmeverfahren ist die Polygonierung[5]. Dabei werden für jeden Messzug von Punkt zu Punkt Polarkoordinaten aufgenommen. Da eine Sichtverbindung nur zwischen je zwei Punkten bestehen muss, hat dieses Verfahren bei Bedingungen, wie sie typischerweise im Wald vorherrschen, große Vorteile. Außerdem kann die Messung in relativ kurzer Zeit von einer einzelnen Person durchgeführt werden. Der Polygonzug kann als eigenständige Messung durchgeführt werden oder zur Koordinatenermittlung als Grundlage für weitere Messungen dienen. Die verschiedenen Arten von Polygonzügen werden in Abhängigkeit von der geometrischen Form und den Anschlussbedingungen unterschieden in:

- **Ringpolygone,** die Flächen umschließen.
    - **Geschlossenes Ringpolygon**: Der letzte gemessene Vektor endet beim Startpunkt.
    - **Offenes Ringpolygon**: Der Schlussvektor wird nicht gemessen sondern später rechnerisch ermittelt.
- **Linienzüge**, die keine Flächen umschließen.

- **Freie Polygonzüge,** die nicht an bekannte Punkte angeschlossen sind.
- **Angeschlossene Polygonzüge**:
    - **Einseitig angeschlossene Polygonzüge:** Ein Punkt ist bekannt.
    - **Mehrfach angeschlossene Polygonzüge:** Mehrere Punkte sind bekannt.

[5] Polygon = „Vieleck“: griech. „polys“ = „viel, mehr“, griech. „gony“ = „Eck, Knie“

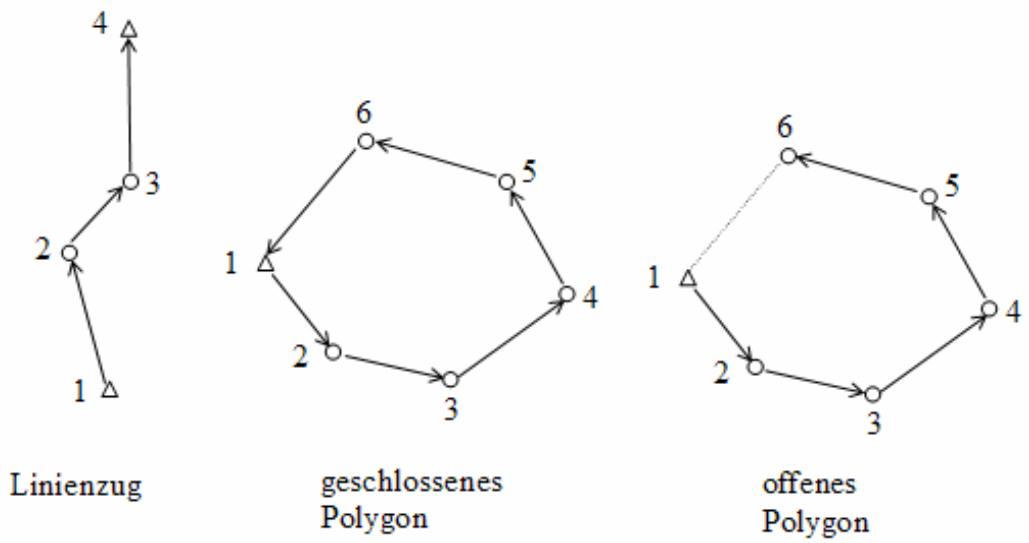


Abbildung 2.7-1 Formen der Polygonierung

Der Regelfall bei der Vermessung von Flächen ist das Ringpolygon, im Weiteren als „**geschlossenes Polygon**“ bezeichnet. Wird der Schlussvektor eines Ringpolygons nicht gemessen, so wird dieser Sonderfall des freien Polygonzuges als „**offenes Polygon**“ bezeichnet. Polygonzüge, die keine Fläche umschließen, werden **„Linienzug“** genannt. Für Linienzüge, die mehrere bekannte Punkte beinhalten, ist eine rechnerische Kontrolle möglich. Man unterscheidet sie deshalb von freien Linienzügen. Die Kombination der einzelnen Messzüge zu Polygonnetzen ist bei umfangreichen Aufnahmen sinnvoll und führt zu fehlertheoretisch günstigen Ergebnissen.

Es ist darauf zu achten, dass die Anlage von Polygonzügen mit möglichst wenigen Punkten erfolgt, um den Zeitaufwand gering zu halten. Um die Messung rechnerisch kontrollieren zu können, sind Polygonzüge zu bevorzugen, bei denen auf bekannte Anfangs- und Endpunkte zurückgegriffen werden kann. Dies ist bei beidseitig angeschlossenen Linienzügen der Fall und ebenso bei geschlossenen Ringpolygonen, weil bei diesen der Ausgangspunkt mit dem Endpunkt zusammenfällt. Die Seiten eines Ringpolygons dürfen sich nicht schneiden. Sehr kurze Seitenlängen wirken sich außerdem ungünstig auf die Präzision der Winkelmessung aus und werden deshalb nach Möglichkeit vermieden.

Bei der Messung werden die einzelnen Vektoren der Reihe nach erhoben. Die Eckpunkte werden zunächst mit Fluchtstäben markiert, dann werden jeweils Richtung, Strecke und ggf. Geländeneigung vom Standpunkt zum Zielpunkt gemessen. Dieser Vorgang wird an jedem Punkt wiederholt. Zur Kontrolle der Richtungsmessung empfiehlt sich ein Rückblick auf den vorhergehenden Standpunkt. Da oft mit einem Satz aus sechs Fluchtstäben gearbeitet werden muss, können die Fluchtstäbe bereits gemessener Eckpunkte entfernt und weiter vorn wieder verwendet werden. Der Stab, der den Ausgangspunkt markiert, muss bei der Aufnahme als geschlossenes Polygon bis zum Abschluss der Messung an seinem Ort verbleiben. Punkte, die dauerhaft vermarkt werden sollen, dürfen natürlich auch nicht vorschnell entfernt werden.

2.7.3. Polarverfahren

Beim Polarverfahren werden alle aufzunehmenden Punkte von einem festen Standpunkt aus gemessen. Von diesem Punkt aus muss Sichtverbindung zu allen Messpunkten bestehen. Daher ist das Verfahren nur bei übersichtlichen Geländeverhältnissen geeignet.

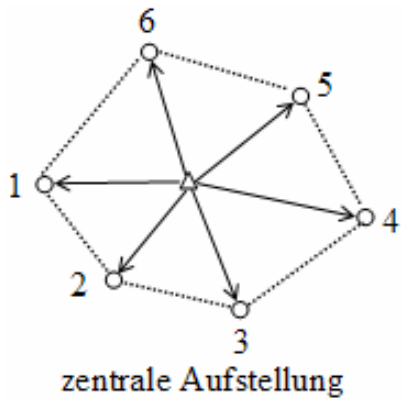


Abbildung 2.7-2 Polarverfahren

In der vorliegenden Arbeit wird das Polarverfahren auch **„zentrale Aufstellung“** genannt. Der Instrumentenstandpunkt liegt dessen ungeachtet nicht zwingend innerhalb der Figur. Die „externe Aufstellung“ wird wie die zentrale Aufstellung behandelt.

Die Winkelmessung kann mit Fluchtstäben und Handkompass durchgeführt werden. Das Polarverfahren bietet sich indessen besonders für den Einsatz von geodätischen Instrumenten wie Forstbussole oder Theodolit an. Da der Instrumentenstandpunkt nicht verändert werden muss, kann die Winkelmessung gerade bei vielen Messpunkten schnell und präzise erfolgen. Für die Streckenmessung sind elektronische Geräte von Vorteil. Wird die Aufnahme von zwei Personen durchgeführt und stehen entsprechende Messgeräte zur Verfügung, so ist ein rationelles Arbeiten mit hoher Präzision möglich.

Auf die Aufnahmereihenfolge der Punkte ist besonders zu achten. Um die Ergebnisse später tabellarisch auswerten zu können, müssen die einzelnen Messpunkte in der Reihenfolge notiert werden, in der sie in der Figur vorkommen. Ein sauberer Feldriss ist stets empfehlenswert.

Der Instrumentenstandpunkt ist nicht Teil der zu messenden Geometrie und muss daher nicht zwingend dauerhaft markiert werden. Beim Einhängen in gegebene Koordinatensysteme ist besonders darauf zu achten, ob ein Messpunkt oder der Instrumentenstandpunkt bekannt ist. Letzterer kann aus den erhobenen Messwerten errechnet werden.

Die Messgenauigkeit kann nur dann überprüft werden, wenn zusätzlich mindestens ein Spannmaß, also der Abstand zwischen zwei Messpunkten, erhoben wird. Die Spannmaße lassen sich auch aus je zwei gemessenen Strecken (Abstände vom Instrumentenstandort zum Messpunkten) und dem eingeschlossenen Winkel berechnen. Aus der Differenz zwischen berechnetem und gemessenen Wert lassen sich Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Messung ziehen.

2.7.4. Orthogonalverfahren

Das Orthogonalverfahren, u.a. bei BAUMANN (1999) und MATTHEWS (1993) auch Rechtwinkel-, seltener Koordinatenverfahren genannt, ist ein Verfahren, das für weniger umfangreiche Messungen in übersichtlichem Gelände geeignet ist. Auch beim Einmessen von Untersuchungsobjekten entlang eines Transsekts kommt dieses Verfahren zum Einsatz. Als Messgeräte genügen ein Winkelprisma mit Schnurlot und ein Bandmaß.

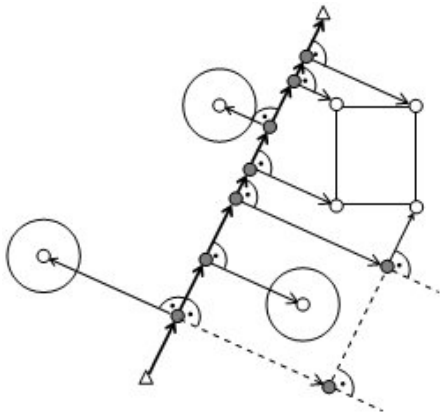


Abbildung 2.7-3
Orthogonalverfahren

Zuerst wird eine Grundlinie als Basis für die Aufnahme abgesteckt. Diese sollte zweckmäßigerweise so gewählt werden, dass die Lote auf die aufzunehmenden Punkte möglichst kurz sind. Es werden dann die Lote von den zu messenden Punkten auf die Grundlinie mit Hilfe eines Winkelprismas gefällt und die Lotfußpunkte mit Zählnadeln markiert. Die Längen der Lote werden gemessen und in den Feldriss eingetragen. Abschließend werden die Lotfußpunkte auf der Basislinie fortlaufend gemessen, um eine Addition der Messfehler zu verhindern.

Abbildung 2.7-3 verdeutlicht das Aufnahmeschema. In diesem Beispiel wurden drei Bäume und ein Gebäude in die Messung einbezogen. Können einzelne Punkte, wie hier die hintere Gebäudeecke, nicht direkt eingesehen werden, so müssen weitere Hilfslinien definiert werden. Im gezeigten Fall verläuft eine solche parallel zur Basislinie. Da durch die zusätzliche Winkelmessung weitere Fehlerquellen geschaffen werden, sind solche Linien unbedingt zu sichern, wie durch gestrichelte Linien angedeutet ist.

Das Orthogonalverfahren ermöglicht eine sehr präzise Messung, wobei jedoch die Handhabung des Winkelprismas einiger Übung bedarf. Eine rechnerische Kontrolle ist bei diesem Verfahren nicht möglich, daher sind zusätzliche Strecken zu erheben, unter Zuhilfenahme derer Dreiecke gebildet werden können und somit eine Kontrolle nach Satz des Pythagoras ermöglicht wird (vgl. Triangulation).

Wird die Basislinie als Achse eines lokalen Koordinatensystems gesehen, so ergeben sich aus den gemessenen Werten für die Strecke auf der Basislinie und die Länge des Lotes direkt kartesische Koordinaten, ohne dass eine Rechnung notwendig ist.

2.7.5. Einhängen in bekannte Koordinatensysteme

Für manche Aufgaben reicht es aus, die Lage der Messpunkte zueinander und damit die Form und Größe einer Fläche zu bestimmen. Sollen die aufgenommenen Geometrien jedoch später

in eine Karte eingezeichnet werden oder wieder auffindbar sein, so ist das Einhängen der Messung in ein gegebenes Koordinatensystem, meist das Landeskoordinatensystem, notwendig. Prinzipiell genügt es einen Punkt mit bekannten Koordinaten, wie beispielsweise einen Grenzstein, zweifelsfrei zu identifizieren und in die Messung mit aufzunehmen. Dieser Punkt wird als Einhängepunkt bezeichnet. Je mehr Einhängepunkte verwendet werden, umso besser kann die Messung gesichert werden. Ist der bekannte Punkt nicht Teil der aufzunehmenden Geometrie, muss diese mit einer gesonderten Messung eingehängt werden. Zur Koordinatenberechnung ohne Einhängepunkt werden fiktive Startpunktkoordinaten wie z.B. (1000,1000) vorgegeben um negative Koordinatenwerte zu vermeiden.

Sind im Gelände keine bekannten Punkte in akzeptabler Messentfernung vorhanden, so können die Koordinaten des Einhängepunktes auch mit einem GPS-Gerät bestimmt werden. Ein solches Vorgehen macht jedoch nur in Ausnahmefällen Sinn, da genaue GPS-Geräte prinzipiell für die gesamte Messung verwendet werden könnten und weniger genaue Messgeräte für die Ermittlung des Einhängepunktes nur bedingt geeignet sind.

2.8. Auswertung

2.8.1. Ziel der Auswertung

In der Auswertung werden ausgehend von den erhobenen Messwerten alle Werte errechnet, die das Ergebnis der Messung umfassen soll. Welche Werte dies im Einzelfall sind ist abhängig vom Zweck der Aufnahme, meist sind es jedoch die kartesischen Koordinaten der Eckpunkte. Bei der Vermessung von Flächen interessieren primär ihre Größe und der Umfang, bei Linienzügen hingegen deren Länge. Es ist sinnvoll zusätzlich eine Überprüfung der aufgenommenen Messwerte durchzuführen und, sofern das Messverfahren dies zulässt, Aussagen über die Genauigkeit der Aufnahme zu treffen. In den meisten Fällen ist außerdem eine maßstabsgerechte Zeichnung erforderlich. Je nachdem, wie die Ergebnisse gespeichert und weiterverarbeitet werden sollen, ist auch die Übernahme in bestehende EDV-Systeme notwendig.

2.8.2. Manuelle Auswertung

Geodätische Berechnungen sind komplex und daher aufwändig. Die Auswertung mit dem Taschenrechner nimmt viel Zeit in Anspruch. Die Durchführung einer solchen manuellen Auswertung lernt der angehende Förster bereits im Grundstudium. An dieser Stelle sollen daher nur die grundsätzlichen Möglichkeiten der manuellen Auswertung genannt werden.

Die **rechnerische Auswertung** erfolgt zweckmäßigerweise tabellarisch und unter Zuhilfenahme eines wissenschaftlichen Taschenrechners, der beispielsweise mit der Umrechnung

von Polar- in kartesische Koordinaten hilfreiche Funktionen bietet. Es sollte der interne Speicher genutzt werden, da Taschenrechner mit einer höheren Genauigkeit arbeiten als die Anzahl der auf dem Display ausgegebenen Ziffern unterstellt. So entfällt auch das fehlerträchtige und aufwändige Abtippen von notierten Zwischenergebnissen. Dennoch ist der Aufwand einer manuellen Berechnung hoch. Um Rechenfehler zu vermeiden, müssen bestimmte Spalten doppelt berechnet und ihre Ergebnisse auf Übereinstimmung geprüft werden. Bei umfangreicheren Aufnahmen ist die Gefahr von Tippfehlern groß. Der Fehler kann oft nur durch eine komplette Neuberechnung gefunden werden. Die Zeichnung kann im Anschluss mit Hilfe der ermittelten Koordinaten erstellt werden.

Sollen Messergebnisse lediglich in eine Karte eingezeichnet werden, so ist die rein **graphische Auswertung** ausreichend. Gemessene Winkel und Strecken stellen Polarkoordinaten dar, die mit Geodreieck, Zirkel und Lineal aufgezeichnet werden können. Die Strecken sind abhängig vom Maßstab zu verkürzen und die Neigung ist entsprechend zu berücksichtigen (vgl. 2.10.3). Die graphische Bestimmung der Größe einer Fläche ist entweder durch Auszählen von Schätzquadraten oder mittels eines Polarplanimeters möglich. Letzteres ist ein mechanisches Integrationsgerät. Nach dem Umfahren der Fläche mit der Fahrlupe wird zunächst eine dimensionslose Einheit angezeigt, die den Rollenabwicklungen entspricht. Mit maßstabsabhängigen Umrechnungsfaktoren ergibt sich hieraus die Flächengröße.

Manuell ausgewertete Messungen müssen für die **Übernahme in EDV-Systeme** digitalisiert werden. Dies geschieht durch das Einscannen der Zeichnung und anschließendes Erkennen der Umrisslinie. Professionelle GIS-Systeme verfügen über Werkzeuge, die Umrisslinien „fangen“ können. Alternativ können die eingescannten Vorlagen auch auf dem Monitor digitalisiert werden. Findet ein Digitalisiertisch Anwendung, entfällt das Einscannen. Im Anschluss an die Digitalisierung wird die erfasste Geometrie georeferenziert. Das bedeutet, dass die Lage auf der Erdoberfläche mit Hilfe einer Referenzkarte oder bekannter Punkte festgestellt und gespeichert wird. Die zur Geometrie gehörenden Attributdaten werden im Regelfall in einer Datenbank erfasst.

2.8.3. Auswertung mit Hilfe der EDV

Die Nutzung von Computerprogrammen, die nach erfolgter Dateneingabe die Auswertung weitgehend automatisch vornehmen, ist eine wesentlich rationellere Methode. Hierdurch werden auch potentielle Fehlerquellen minimiert, was zu einer höheren Datenqualität führt. Es stehen verschiedene Softwarelösungen zur Auswahl, die für diesen Zweck eingesetzt werden können.

Professionelle GIS-Software wie z.B. ArcGIS von ESRI oder die freie Alternative „Geographic Resources Analysis Support System“ (GRASS) bieten hierfür Möglichkeiten. Forststudenten bekommen im Rahmen ihres Studiums heutzutage einen guten Einblick in die Funktionsweise und Bedienung solcher GIS Software. Für die Nutzung spezieller Funktionen ist jedoch eine Schulung oder ein Selbststudium der Handbücher und Hilfefunktionen notwendig. Teilweise müssen Erweiterungen installiert werden. Auch ist die Anschaffung kommerzieller Software mit Lizenzkosten in nicht geringer Höhe verbunden. Aus diesen Gründen ist der Einsatz professionellen GIS-Systeme nicht in jedem Fall problemlos möglich.

Alle dem Autor bekannten Programme, die bislang im bayerischen Forstalltag eingesetzt wurden, haben gewisse Einschränkungen. So wird beispielsweise das Messverfahren geschlossenes Polygon nicht unterstützt, es besteht keine Möglichkeit der Datenspeicherung in einem universellen Format oder das Programm wurde ausschließlich für DOS Betriebssysteme entwickelt. Um ein einfach anwendbares Werkzeug für den Einsatz in der forstlichen Praxis zu schaffen, wurde das Programm Aequometer entwickelt und kostenfrei zur Verfügung gestellt.

2.9. Auswertung mit dem Aequometer

2.9.1. Grundlegendes

Der Aequometer ist eine Arbeitsmappe für Microsoft Excel zur Auswertung polar vermessener Geometrien. Er wurde vom Autor mit dem Fokus auf die forstliche Arbeit entwickelt. Die Verwendung des Aequometers in der Version 3.0 wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (StMLF) für die Flächenermittlung bei der forstlichen Förderung in Bayern freigegeben. Dies wurde im LMS F2-NW 269-1459 vom 7.8.2006 bekannt gegeben. Durch einen weiten Benutzerkreis angeregt, wurde diese Version weiterentwickelt und verbessert. Der Aequometer unterstützt in der aktuellen Version komplexe Messverfahren und Mehrsprachigkeit, außerdem wurde der Bedienkomfort verbessert und der Funktionsumfang erweitert. Die Rückwärtskompatibilität mit früheren Versionen ist in vollem Umfang gegeben. Derzeit wird eine neue Version entwickelt um den Aequometer auch mit Office 2007 voll nutzbar zu machen. Diese soll Mitte Juli 2008 erscheinen. Es ist davon auszugehen, dass die neue Version ebenfalls die Freigabe für fördertechnisch relevante Messungen erhalten wird.

Der Aequometer ist mittlerweile das auf Revierleiterebene am häufigsten eingesetzte Programm für die Auswertung polar vermessener, förderrelevanter Flächen. Der Vertrieb der zugelassenen Version für die Ämter für Landwirtschaft und Forsten (ÄLF) erfolgt über die Staatliche Führungsakademie für Landwirtschaft und Forsten (FüAk). Für weitere Nutzer steht das Programm im Internet unter http://www.aequometer.de kostenfrei zum Download zur Verfügung.

Der Aequometer ist quelloffen, was heißt dass die programmatischen Bestandteile einsehbar sind und von erfahrenen Anwendern auch angepasst werden können und dürfen. Die Lizenzbedingungen GPL (1991) ermöglichen dies und die freie Weitergabe des Programms. Eine Weitergabe von veränderten Versionen ist jedoch nur unter bestimmten Bedingungen zulässig. Näheres ist in den Lizenzbedingungen aufgeführt. Ob eine unveränderte Originalversion vorliegt kann anhand einer digitalen Signatur festgestellt werden, deren öffentlicher Schlüssel ebenfalls unter der oben genannten Internetadresse zur Verfügung gestellt wird. Diese Signatur wird beim Speichern entfernt, da der dazugehörige private Schüssel dem Anwender nicht bekannt ist.

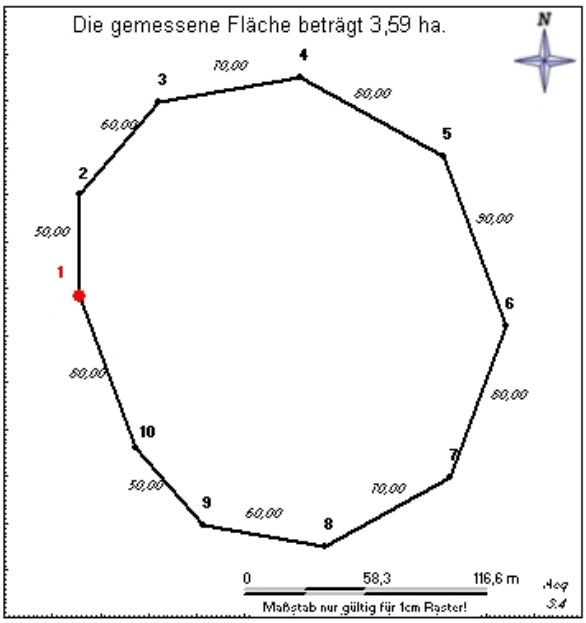
Im Folgenden werden das Programm vorgestellt und die angebotenen Möglichkeiten zur Auswertung der vorgenannten Aufnahmeverfahren aufgezeigt. Es können neben den genannten Funktionen selbstverständlich auch alle Möglichkeiten genutzt werden, die Excel zur Verfügung stellt.

Polare Aufnahme einer Fläche als geschlossenes Ringpolygon mit streckenproportionaler Fehlerverteilung

AntragsNr		
Antragsteller		
Massnahme		
Aufnehmend		
Datum		
FlNr/Dist		
Gde/Abt		
Gmkg/Best		
Flaeche	3,59733	ha
Umfang	0,68999	km
Toleranz	0,02688	ha
Quelle	Aequometer v 3.4	
Prfsum		
Bemerkung		
Diplomarbeit, Beispielfläche		

Länge Fehler: 2,91 m
Länge Fehler %: 0,4%
Fläche Fehler %: 0,7%
☐ Expertenmodus

Winkelmaß: (Richtung)	Grad
Winkelmaß: (Neigung)	Grad
a oder z?	a
Diag. opt(j/n)?	J
Man. Maß.:	



Standpunkt	Zielpunkt	Richtung	Strecke [m]	Neigung	Rechtswert	Hochwert
					0,00000	0,00000
1	2	0,0	50,00		-0,07209	50,19806
2	3	40,0	60,00		38,40867	96,39839
3	4	80,0	70,00		107,24429	108,83104
4	5	120,0	80,00		176,41098	69,14793
5	6	160,0	90,00		207,06304	-15,06790
6	7	200,0	80,00		179,58609	-89,92642
7	8	240,0	70,00		118,86339	-124,64914
8	9	280,0	60,00		59,68842	-113,99258
9	10	320,0	50,00		27,47695	-75,49230
10	11	340,0	80,00		0,00000	0,00000

Abbildung 2.9-1 Das Tabellenblatt „Polygon“

2.9.2. Tabellenblätter

Das Tabellenblatt **Copyright**, das beim Öffnen des Programms aktiv ist, enthält Hinweise zu den Lizenzbedingungen und sowie zur Anwendung des Programms. Außerdem kann hier zwischen den Sprachen Deutsch und Englisch gewählt werden.

Im Tabellenblatt „**Polygon“** wird die Auswertung aller Aufnahmeverfahren vorgenommen. Auf das Eingabeschema und die verschiedenen Berechnungsmodi wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen. Daten in diesem Tabellenblatt können als Textdatei gespeichert und als ESRI Shapedatei exportiert werden. Die graphischen Elemente der Zeichnung sowie die Größe der Zeichnungsfläche können mittels der dafür programmierten Formulare an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden.

Das Tabellenblatt „**Polar“** dient der Überprüfung von Messungen nach dem Verfahren der zentralen Aufstellung (Polarverfahren). Wie in 2.7.3 beschrieben, dienen zusätzlich zu den eigentlichen Messwerten erhobene Spannmaße der Kontrolle der Messgenauigkeit und damit

der Sicherung der Messung. Aus der Differenz zwischen den Messwerten und den berechneten Spannmaßen wird, wie in Abschnitt 2.10.11 beschrieben, der mittlere Fehler berechnet und im Tabellenblatt „Polygon“ angezeigt

Messwerte die im Orthogonalverfahren erhoben wurden, werden im Tabellenblatt **Orthogonal** eingegeben. Das Speichern der Polygondatei erfolgt ebenfalls in diesem Blatt. Die Messwerte werden durch einen Klick auf die Schaltfläche „Übertragen“ in das Tabellenblatt „Polygon“ übernommen. Dort werden sie als Linienzüge ausgewertet. Alternativ kann die Berechnung der Koordinaten auch innerhalb eines Programmteils erfolgen, so dass nur die Punkte übertragen werden.

Das Tabellenblatt **Trigonometrie** ist ein Hilfsmittel zur Durchführung von Berechnungen im Dreieck, die sowohl bei der Triangulation als auch bei der Sicherung von Messwerten durch zusätzlich erhobene Strecken Anwendung finden. Das Tabellenblatt ist rein auf Formeln basierend konzipiert und wurde somit ohne Verwendung von Makros erstellt.

Im Tabellenblatt **GK<->WGS84** wird eine 7-Parameter-Transformation nach Helmert durchgeführt, um ein Koordinatenpaar vom Bayerischen Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger in das WGS84-System zu übertragen. Die verwendeten Transformationsparameter sind allerdings nicht die amtlich gültigen, sondern wurden aus Angaben im Internet übernommen. Daher kann die Genauigkeit der Ergebnisse nicht garantiert werden. Eine Überprüfung anhand mehrerer, amtlich gesicherter Passpunkte hat bislang nicht stattgefunden. Dies ist im Programm deutlich vermerkt.

Letzteres Tabellenblatt kann beispielsweise dann Anwendung finden, wenn ein mit einem Low-Cost GPS-Gerät gemessener Punkt dazu genutzt werden soll, die gemessene Geometrie in das Landeskoordinatennetz einzuhängen. Eine gewisse Lageungenauigkeit wird damit in Kauf genommen. Soll die Transformation höheren Genauigkeitsansprüchen genügen, so sind die amtlichen Transformationsparameter beim zuständigen Landesamt für Vermessung zu beziehen und das Ergebnis zu überprüfen.

2.9.3. Aufruf der Funktionen

Funktionen wie das Öffnen einer zuvor gespeicherten Geometrie werden über den Menüpunkt „Aequometer“ in der Excel Menüleiste aufgerufen. Beim Start des Aequometer wird dieser Menüpunkt dynamisch erzeugt und ist links oben zu finden. Beim Beenden wird er wieder gelöscht. Im Quellcode ist auch die Erzeugung einer Aequometer Symbolleiste vorgesehen. Dieser Programmbestandteil ist jedoch deaktiviert. In der vorliegenden Version können alle Funktionen auch über Schaltflächen im Tabellenblatt aufgerufen werden.

Abbildung 2.9-2
Aufruf der Funktionen

2.9.4. Eingabe von Kenndaten und Winkelmaßen

Um die gemessene Geometrie später zweifelsfrei zuordnen zu können, werden dazugehörige Kenndaten gespeichert. Welche das sind, kann von Fall zu Fall variieren. In Abbildung 2.9-1 ist links neben der Zeichnung ein Kasten zu erkennen, der für die Eingabe der Kenndaten vorgesehen ist. Die Bezeichnung der einzelnen Felder entspricht den Erfordernissen bei der Aufnahme von Förderflächen. Sie können jedoch vom Benutzer geändert werden. Diese Kenndaten werden beim Export als Shapedatei gelesen und als Datenbankdatei zusätzlich zu den Geometrien exportiert. Unterhalb der Kenndaten werden die Ergebnisse der Berechnungen angezeigt.

Vor der Auswertung sind außerdem die Winkelmaße der verwendeten Messgeräte festzulegen. Hierfür sind Drop-Down Menüs unterhalb der Kenndaten und Ergebnisse vorgesehen. Für die Richtung kann zwischen den Einheiten Grad oder Gon gewählt werden, für die Neigung zwischen Grad, Gon oder Neigungsprozent. Außerdem ist anzugeben, ob der Neigungswinkel als Azimutalwinkel (dabei ist null ist gerade voraus) oder Zenitwinkel (dabei ist null oben) verwendet wird. Das Feld „Diag. opt(j/n)?“ legt fest, ob das Diagramm auf die Größe der Zeichnungsfläche optimiert dargestellt werden soll, oder ob ein gerader Maßstab gewünscht ist. Im Feld darunter kann ein vorgegebener Maßstab eingetragen werden.

2.9.5. Eingabeschema

Die Tabelle zur Dateneingabe wurde einer Messwertetabelle nachempfunden. Jede Zeile enthält einen gemessenen Abschnitt. Die Spalten „Standpunkt“ und „Zielpunkt“ enthalten die Bezeichnungen des Fußpunktes und der Spitze des gemessenen Vektors. Danach folgen die Messwerte in der gewählten Einheit. Rechts daneben werden die berechneten Koordinaten angezeigt. Die Koordinaten des Einhängepunktes können oberhalb des ersten Vektors angegeben werden.

2.9.6. Expertenmodus

Im Expertenmodus werden weitere Spalten „Rechtswert2“ und „Hochwert2“ eingeblendet. In diese Spalten können bekannte Koordinaten eingegeben werden. Sollten sich Messwerte in der gleichen Zeile befinden, so werden diese ignoriert. Geometrien können entweder als Koordinatenliste oder gemischt aus Messwerten und Koordinaten eingegeben werden.

Soll mehr als eine Geometrie ausgewertet werden, so sind die „Marker“ zu aktivieren. Hinter jeder Zeile erscheint dann eine Schaltfläche, die sich bei Aktivierung rot färbt. Jeder aktivierte Marker symbolisiert den Startpunkt einer neuen Geometrie. In der Zeichnung und beim Export als Shapedatei sind die Geometrien nicht verbunden.

Im Expertenmodus werden Geometrien grundsätzlich so berechnet, wie sie eingegeben wurden. Es findet keine Fehlerverteilung oder Berechnung des Schlussvektors statt. Eine Ausnahme bildet der „Linienzug mit mehreren Einhängepunkten“, wie in folgendem Abschnitt beschrieben wird.

Beim Export als Shapedatei ist zu beachten, dass Polygone, die ihre Fläche innen haben, im Uhrzeigersinn orientiert sein müssen. Außerdem müssen der erste und der letzte Punkt eines Polygons identisch sein, um die Figur zu schließen. Bei deaktiviertem Expertenmodus werden Polygone stets automatisch geschlossen und ihr Drehsinn ist unerheblich.

Die Fläche, der Umfang sowie Fehlerwerte werden im Expertenmodus nicht automatisch berechnet. Wenn diese Werte benötigt werden, kann dies mit den im Abschnitt 2.10 beschriebenen Formeln individuell realisiert werden. Alternativ können die Flächen auch als Shapedatei exportieren werden, um die Berechnungen von einem GIS-System durchführen zu lassen.

2.9.7. Berechnungsmodi

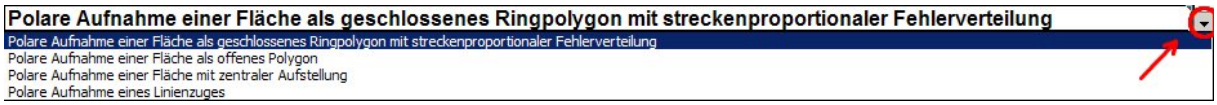


Abbildung 2.9-3 Auswahl der Berechnungsmodi

Der Aequometer bietet im Tabellenblatt „Polygon“ fünf Berechnungsmodi für verschiedene Aufnahmeverfahren. Der gewünschte Modus wird in dem Drop-Down-Menü der ersten Zelle ausgewählt.

Der Berechnungsmodus **geschlossenes Polygon mit streckenproportionaler Fehlerverteilung** erwartet ein geschlossenes Polygon, das aus mindestens drei Messwerten besteht. Die letzte Messung endet, wie in 2.7.2 beschrieben, am Startpunkt. Dieser wird rot dargestellt.

Der Abschlussfehler wird streckenproportional verteilt, wodurch sich die Lage der Eckpunkte ändert und das Polygon automatisch geschlossen wird. Die Fläche und der Umfang sowie der Abschlussfehler werden als Ergebnis angezeigt.

Beim Berechnungsmodus **offenes Polygon** wird ein Polygon erwartet, bei dem der Schlussvektor nicht gemessen wurde. Dieser wird berechnet und blau eingezeichnet. Diese Berechnungsmethode kann auch verwendet werden, um den Abschlussfehler eines geschlossenen Polygons darzustellen. Beim offenen Polygon findet keine Fehlerverteilung statt. Es werden die Flächengröße und der Umfang berechnet.

Der Berechnungsmodus **zentrale Aufstellung** wird verwendet um Polygone auszuwerten, die mit dem Polarverfahren aufgenommen wurden. Das Polygon wird hierbei automatisch geschlossen und der Instrumentenstandpunkt als roter Punkt in der Zeichnung dargestellt. Beim Export als Shapedatei wird nur das Polygon exportiert. Die Überprüfung der Messgenauigkeit anhand zusätzlich erhobener Spannmaße findet im Tabellenblatt „Polar“ statt. Es werden der mittlere Fehler berechnet, die Flächengröße und der Umfang. Eine Fehlerverteilung findet nicht statt. Im Expertenmodus wird das Polygon nicht automatisch geschlossen. In diesem Fall ist der Startpunkt am Ende zu wiederholen, um eine geschlossene Fläche zu erhalten.
Der Berechnungsmodus **Linienzug** dient der Auswertung von freien oder einseitig angeschlossenen Linienzügen. Es findet weder eine Fehlerberechnung, noch eine Fehlerverteilung statt. Als Ergebnis wird die Länge der Strecke berechnet.

Der Berechnungsmodus **Linenzug mit mehreren Einhängepunkten** schließlich dient der Auswertung mehrfach angeschlossener Polygonzüge. Mehrere bekannte Punkte werden durch Messung verbunden. Zur Auswertung ist der Expertenmodus zu aktivieren. Die Koordinaten der bekannten Punkte werden dann in die Spalten „Rechtswert_2“ und „Hochwert_2“ eingegeben. Zwischen jeweils zwei bekannten Punkten findet eine streckenproportionale Fehlerverteilung analog zum Berechnungsmodus „geschlossenes Polygon“ statt. Die Einhängepunkte werden in der Zeichnung blau dargestellt. Berechnet werden die Länge des Linienzuges sowie der mittlere Fehler.

2.9.8. Orthogonalverfahren

Orthogonalverfahren

ID	15
Author	J. Loose
Date	05.11.2007
Filename	Orthogonalverfahren
Quelle	Aequometer v 3.4
Prfsum	
Bemerkung	

Einhängepunkt		
Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert
F0	10000	10000

Grundlinie			Hilfslinien		
Richtung:		45 ☑ konstant	rechtwinklig zur Grundlinie		
Bezeichnung	Strecke fort-schreiben	Neigung	Bezeichnung	Strecke - = links + = rechts	Neigung
F1	10	1	A	-30	10
F2	20	2	B	-20	9
F3	30	3	C	-10	8
F4	40	4	D	0	7
F5	50	5	E	10	6
F6	60	6	H	20	5
F7	70	7	I	30	4
F8	80	8	J	40	3
F9	90	9	K	50	2
F10	100	10	L	60	1

Strecke	fortschreibend
Winkelmaß: (Richtung)	Grad
Winkelmaß: (Neigung)	Grad
a oder z?	a

☐ Nur Koordinaten übertragen

Übertragen

Abbildung 2.9-4 Das Tabellenblatt „Orthogonalverfahren“

Das Eingabeschema beim Orthogonalverfahren gleicht ebenfalls einer Messwerttabelle. Neben den Kenndaten und Winkelmaßen sind folgende Messwerte einzugeben:

Einhängepunkt:

Die Koordinaten des Startpunktes der Messung als Rechts- und Hochwert.

Grundlinie:

„Richtung“: Der Winkel der Grundlinie gegen Nord. Ist dieser nicht konstant, so kann für jeden Vektor ein Winkel angegeben werden.

„Strecke“: Im Regelfall werden die Entfernungen der Messpunkte zum Einhängepunkt fortlaufend gemessen. Wurden die Längen der Einzelvektoren erhoben, können bei entsprechender Einstellung auch Bindemaße eingegeben werden. Diese entsprechen der Länge des betreffenden Abschnittes der Grundlinie. Die Verwendung von Bindemaßen macht z.B. bei gewinkelten Grundlinien Sinn.

Hilfslinien:

Die Hilfslinien stehen stets lotrecht zur Grundlinie. Die Strecke bezeichnet daher den senkrechten Abstand des Messpunktes zum Fußpunkt auf der Grundlinie. Ist die Richtung der

Grundlinie nicht konstant, so ist der Vektor zum Fußpunkt der Hilfslinie für den rechten Winkel maßgeblich. Die Spitze der Hilfslinie ist der zu vermessende Punkt.

Da beim Orthogonalverfahren keine automatisierte Überprüfung der Messgenauigkeit erfolgt, ist die Messung durch zusätzlich gemessene Strecken zu sichern. Die Auswertung kann mit den berechneten Koordinaten im Tabellenblatt „Trigonometrie“ erfolgen.

2.9.9. Trigonometrie

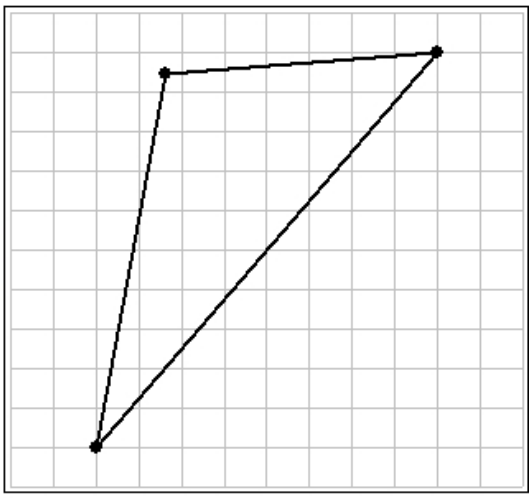
Im Tabellenblatt „Trigonometrie“ kann aus beliebigen Kombinationen von Seitenlängen, Innenwinkel oder Koordinaten ein Dreieck berechnet werden, sofern es durch die Angaben eindeutig definiert ist. Als Ergebnis werden die fehlenden Seitenlängen und Innenwinkel, die Höhen, der Umfang, die Fläche und die Koordinaten der Eckpunkte angezeigt. Der Rechenweg wird als textbasierte Formel angezeigt. Sind keine Koordinaten vorgegeben, so wird der Punkt A auf (0,0) gesetzt, um das Dreieck darstellen zu können. Wenn nur eine Eckpunktkoordinate vorgegeben ist, kann das Dreieck um diesen Punkt gedreht werden.

Zur Auswertung von Triangulationen können die gemessenen Dreiecke nacheinander eingegeben und die Koordinaten manuell in das Tabellenblatt „Polygon“ kopiert werden.

Berechnungen im Dreieck

Eingabe			Ausgabe		
Strecken und Winkel			Strecken und Winkel		
a	2,00		a	2,00	
b	3,00		b	3,00	
c	4,00		c	4,00	
α			α	32,17	
β			β	51,74	
γ			γ	116,09	
	Rechtswert	Hochwert		Rechtswert	Hochwert
A	455932	529482	A	455932,00	529482,00
B			B	455934,49	529485,13
C			C	455932,50	529484,96
			Höhen [m]		
			ha	2,90	
			hb	1,94	
			hc	1,45	
			Umfang [m]		
			u	9,00	
			Fläche [m²]		
			A	2,90	

Winkelmaß:	Gon
Beschriftung:	Ohne
Drehung	25



Rechenweg:

a = 2
b = 3
c = 4
α = arccos((a^2 - b^2 - c^2) / (-2 * b * c))
β = arccos((b^2 - c^2 - a^2) / (-2 * c * a))
γ = arccos((c^2 - a^2 - b^2) / (-2 * a * b))

ha = b * sin(γ)
hb = c * sin(α)
hc = a * sin(β)
u = a + b + c
A = a^2 * ha / 2

Ax = 455932
Bx = Ax + c * cos(α)
Cx = Bx + a * cos(200 + α - β)

Ay = 529482
By = Ay + c * sin(α)
Cy = By + a * sin(200 + α - β)

Abbildung 2.9-5 Das Tabellenblatt „Trigonometrie“

2.9.10. Zeichnung

Die Zeichnung ist ein Excel „XY Diagramm“ in dem die eingegebene Geometrie dargestellt wird. Abbildung 2.9-6 zeigt ein Beispiel mit zusätzlichen graphischen Elementen.

Bearbeiten:
Je nach Benutzerwunsch können die Größe der Punkte sowie die Linienstärke festgelegt werden. Die Flächengröße, ein Nordpfeil und der Maßstab können angezeigt oder ausgeblendet werden und ebenso Elemente des Koordinatensystems wie Gitternetzlinien und Achsen. Punktbezeichnungen und Streckenlängen können angezeigt und mit der Funktion „Bezeichnungen verschieben“ feinpositioniert werden. Hierfür wurde ein Programmteil des „XY Chart Labeler“ von Rob Bovey mit freundlicher Genehmigung des Autors in den Aequometer integriert. Die Funktion „Zoom / Pan“ verschiebt die Minima und Maxima der Achsen inkrementell. Hierdurch kann die Zeichnung in Maßstab und Lage verändert werden. Der Maßstab in der Form: 1:5000 ist dann nicht mehr gültig und wird daher ausgeblendet. Zur weitergehenden Gestaltung der Zeichnung und der Datenreihenbeschriftungen können selbstverständlich auch die in Excel verfügbaren Funktionen benutzt werden. Die Zeichnung kann als jpg- oder gif-Grafikdatei exportiert werden.

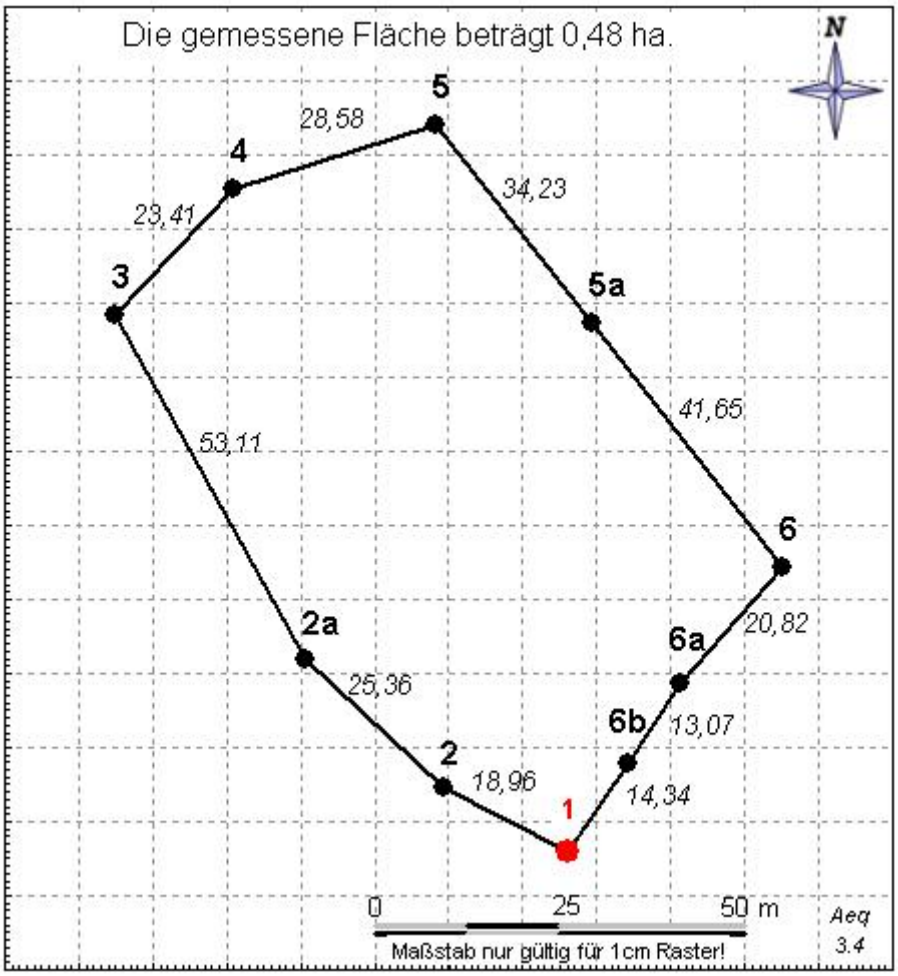


Abbildung 2.9-6 Beispiel für die Zeichnung

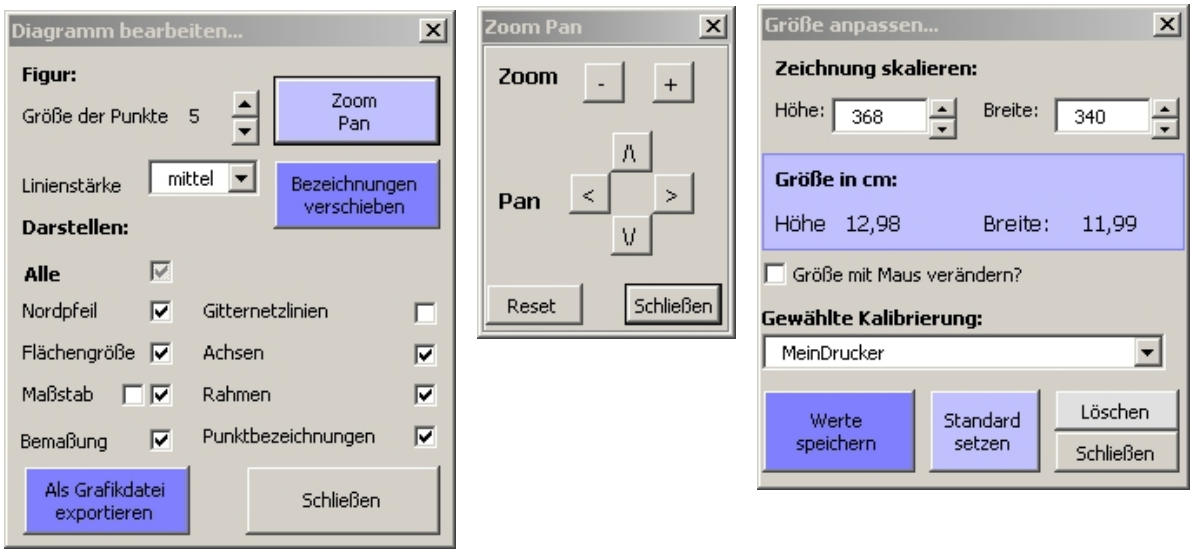


Abbildung 2.9-7 Funktionen zum Bearbeiten der Zeichnung

Kalibrieren zum maßstabsgerechten Ausdruck:
Die Größe der Zeichnungsfläche des Diagramms beträgt 10 cm auf 10 cm. Auf dem Bildschirm ist die Darstellung hinreichend maßstabsgerecht, sofern der Zoomfaktor der Anzeige auf 100 % eingestellt ist. Leider hat sich gezeigt, dass die Größe der Zeichnung bei gleichen Einstellungen auf verschiedenen Druckern variiert. Wenn eine maßstabsgerechte Zeichnung im Ausdruck gefordert ist, ist es daher notwendig, dies durch Nachmessen der Gitternetzlinien zu kontrollieren. Falls erforderlich ist die Größe des Diagramms im Tabellenblatt anzupassen. Hierfür wurde eine Funktion programmiert, mit deren Hilfe sich mehrere ermittelte Größen speichern lassen. Wird nur das Diagramm ausgedruckt, so wird die Originalgröße beibehalten. Wird das gesamte Tabellenblatt „Polygon“ gedruckt so wird dieses auf 65 % seiner ursprünglichen Größe skaliert, um auf ein DIN-A4-Blatt zu passen. Das Diagramm wird dann automatisch entsprechend größer skaliert, dabei ergeben sich jedoch geringfügige Abweichungen zu der Originalgröße.

2.9.11. Übertragen der Geometrien in ein GIS-System

Um im Aequometer vorhandene Geometrien in GIS-Systeme zu übernehmen wird die Funktion „Shapedatei exportieren“ genutzt. Dieses Excel Makro exportiert die aktuell geöffnete Geometrie als Shapedatei. Wenn ein neuer Dateiname angegeben wird, so wird eine neue Shapedatei erzeugt. Wird eine vorhandene Shapedatei ausgewählt, so wird der im Aequometer geöffnete Datensatz an diese Shapedatei angehängt. Damit kann es vermieden werden, für jede Geometrie eine eigene Shapedatei zu erzeugen.

Eine Shapedatei kann nur Objekte einer Form von geometrischen Primitiven speichern, also Punkte, Linien oder Polygone. Je nach gewählter Berechnungsmethode wird der entsprechende Typ Shapedatei exportiert. Das Anhängen von Datensätzen an eine vorhandene Shapedatei unterschiedlichen Typs ist nicht möglich.

Im Normalfall wird einer Geometrie ein Datensatz an Attributen zugeordnet. Die Shapefile Spezifikationen ESRI (1998) erlauben es jedoch auch, mehrere Geometrien als einen Datensatz zu behandeln. Solche Multipartshapefiles können mit dem Aequometer im Expertenmodus erzeugt werden.

Eine Shapedatei besteht aus mindestens drei Dateien. Die Datei mit der Endung .shp ist die eigentliche Shapedatei, die die Geometrien enthält. Die Indexdatei mit der Endung .shx beschreibt die Start- und Endpunkte der einzelnen Geometrien, was einen rascheren Zugriff auf die einzelnen Datensätze erlaubt. Bei Verlust der Indexdatei kann diese z.B. mit dem Programm Shape Viewer aus der .shp-Datei neu erzeugt werden. Die .dbf-Datei enthält die Attribute zu den einzelnen Geometrien im DBase Datenbankformat. Die Datenbankdatei ist nicht mit einem Schlüssel, sondern einzig durch die Reihenfolge der Datensätze mit den Geometrien verknüpft. Sollte diese Datei verloren gehen oder beschädigt werden, können die Geometrien von manchen Programmen trotzdem dargestellt werden. Gegebenenfalls ist eine neue, leere .dbf-Datei zu erzeugen. Diese muss den gleichen Dateinamen wie die .shp-Datei haben und muss genau so viele Datensätze enthalten wie die Shapedatei Geometrien enthält.

Vom Aequometer erzeugte Shapedateien enthalten keine Informationen über die verwendete Projektion. GIS-Systeme benötigen diese Information jedoch, um die Geometrien zusammen mit anderen, in der Projektion verschiedenen Daten darstellen zu können. Aus diesem Grund ist die verwendete Projektion beim Laden der Shapedatei in das GIS-System anzugeben. In dieser Diplomarbeit wurde mit dem Landeskoordinatensystem von Bayern, dem Gauß-Krüger-System im Streifen 4 gearbeitet. Sowohl ESRI als auch die freie Bibliothek „proj“, die unter anderem von dem Programm GRASS verwendet wird, unterstützen dieses Koordinatensystem.

Dateibasiertes Verwalten großer Mengen von Geodaten ist unübersichtlich und fehlerträchtig. Daher werden die Geodaten von umfangreicheren Projekten heute meist in Geodatenbanken gespeichert und verwaltet. Mit verschiedenen Werkzeugen z.B. von ESRI oder den freien Bibliotheken „Geospatial Data Abstraction Library“ (gdal) und „OGR Simple Features Library“ (ogr) können Shapedateien in solche Datenbanken eingespielt werden.

2.10. Berechnungen im Aequometer

Im Folgenden sind die Berechnungsschritte dokumentiert, wie sie im Aequometer durchgeführt werden. Die Formeln wurden für die tabellarische Berechnung optimiert, jede Spalte berechnet einen Wert. Die Rechnungen für die einzelnen Vektoren erfolgen zeilenweise. Je nach Komplexität der Aufnahme und der gewählten Kombination von Aufnahmeverfahren erfolgt die Auswertung in einem oder mehreren Schritten. Grundsätzlich ist jedes Aufnahmeverfahren für sich auszuwerten. Die errechneten Koordinaten können dann als Eingangsdaten für den nächsten Auswertungsschritt verwendet werden.

2.10.1. Eingangsdaten

Eingangsdaten sind die im Gelände aufgenommenen Messwerte. Diese spannen Vektoren im dreidimensionalen Raum auf. Die Messwerte für jeden einzelnen Vektor sind:

Richtung φ bezeichnet den horizontalen Richtungswinkel gegen Nord in der Einheit Grad oder Gon.

Strecke (Schrägdistanz) r bezeichnet den Abstand der beiden Punkte, also die Länge des Vektors in der Einheit Meter.

Neigung ϑ bezeichnet den vertikalen Richtungswinkel, also die Geländeneigung. Mögliche Einheiten sind: Grad, Gon, oder Neigungsprozent.

Es stehen zwei Konventionen der Winkelangaben zur Auswahl: Der **Azimutalwinkel** a wobei 0° gerade voraus ist, oder der **Zenitalwinke**l z bei dem 0° nach oben zeigt.

2.10.2. Variablen und Konstanten

Variablen:

A: Die Gesamtzahl der Vektoren des Polygons. Dieser Wert entspricht der Anzahl der berechnenden Zeilen.

i: Die laufende Nummer des aktuell berechneten Vektors. Diese Nummer ist analog zur Zeilennummer, wenn die erste berechnende Zeile mit „1“ benannt wird.

Konstanten:

Die folgenden Konstanten dienen der Handhabung der unterschiedlichen Einheiten der Messgeräte. Alle Berechnungen werden im Bogenmaß durchgeführt. Die Unterscheidung Grad/Gon oder Neigungsprozent findet in der Formel zur Berechnung der Horizontaldistanz statt.

Winkelmaß Horizontal W_{Hz}

$$W_{Hz} = \begin{cases} \frac{\pi}{180}, \text{ wenn } \varphi \text{ in Grad} \\ \frac{\pi}{200}, \text{ wenn } \varphi \text{ in Gon} \end{cases}$$

Formel 1 Konstante W_{HZ}

Winkelmaß Vertikal W_{Vt}

$$W_{Vt} = \begin{cases} \frac{\pi}{180}, \text{ wenn } \vartheta \text{ in Grad} \\ \frac{\pi}{200}, \text{ wenn } \vartheta \text{ in Gon} \end{cases}$$

Formel 2 Konstante W_{Vt}

Neigung a oder z N_{avz}

$$N_{avz} = \begin{cases} -90, & \text{wenn } \vartheta \text{ als Zenitalwinkel in Grad angegeben} \\ -100, & \text{wenn } \vartheta \text{ als Zenitalwinkel in Gon angegeben} \\ 0, & \text{wenn } \vartheta \text{ als Azimutalwinkel angegeben} \end{cases}$$

Formel 3 Konstante N_{avz}

2.10.3. Horizontaldistanz

Die im Kugelkoordinatensystem gemessenen Vektoren werden zur verebneten Darstellung in der Karte in ebene Polarvektoren umgewandelt. Hierzu wird wie in Abbildung 2.10-1 veranschaulicht aus der gemessenen Schrägdistanz r und dem Neigungswinkel ϑ die **Horizontaldistanz** r_{Hz} berechnet. Der Richtungswinkel φ bleibt davon unberührt.

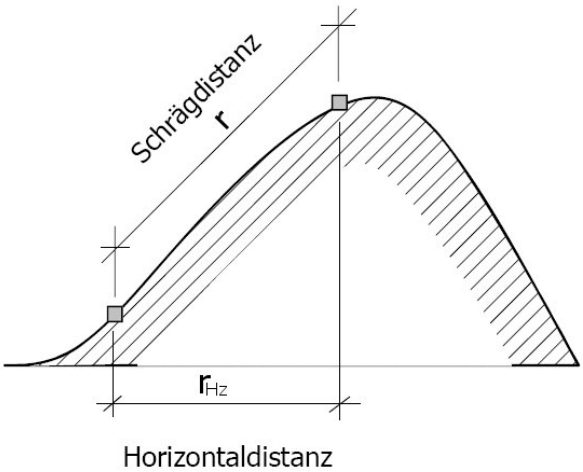


Abbildung 2.10-1 Reduktion von r zu r_{HZ}

Es gilt:

$$r_{Hz,i} = \begin{cases} r_i \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{\vartheta_i}{100}\right)\right), \text{ wenn } \vartheta \text{ in Neigungsprozent} \\ r_i \cdot \cos\left(\left(\vartheta_i + N_{avz}\right) \cdot W_{Vt}\right), \text{ wenn } \vartheta \text{ in Grad oder Gon} \end{cases}$$

Formel 4 Horizontaldistanz r_{HZ}

2.10.4. Orthogonale Koordinatenunterschiede

Die zweidimensionalen, polaren Vektoren, bestehend aus der Richtung φ und der Horizontaldistanz r_{Hz}, werden in diesem Schritt in **orthogonale Koordinatenunterschiede** $\vec{P}_i$ umgerechnet, wobei folgender Zusammenhang verwendet wird.

$$\vec{P}_i = \begin{pmatrix} d_{Y,i} \\ d_{X,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{HZ} \cdot \sin(\varphi \cdot W_{HZ}) \\ r_{HZ} \cdot \cos(\varphi \cdot W_{HZ}) \end{pmatrix}$$

Formel 5
Umrechnung polarer in kartesische Koordinaten

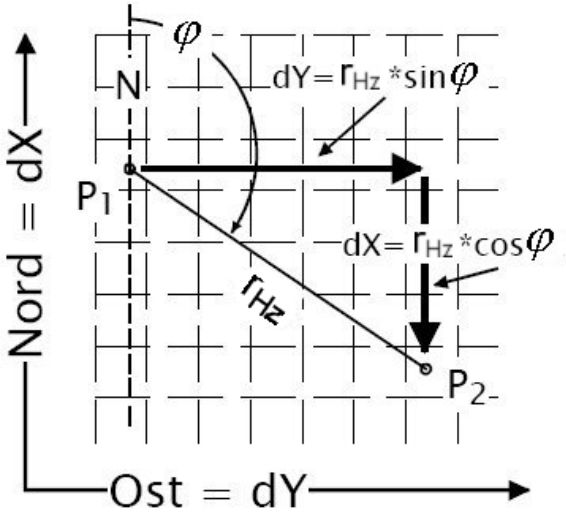


Abbildung 2.10-3
Umrechnung polarer in kartesische Koordinaten

2.10.5. Fehlerverteilung

Bei Polygonzügen mit mehreren bekannten Punkten wird der Abschlussfehler berechnet und anschließend streckenproportional auf die Einzelstrecken verteilt. Da davon ausgegangen wird, dass die Innenwinkel der Figur nicht erhoben werden, ist keine Berechnung des Winkelfehlers möglich.

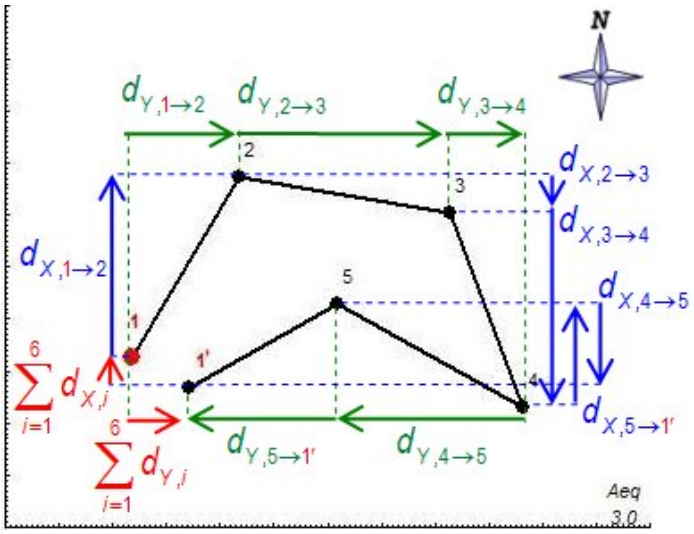


Abbildung 2.10-4
Berechnung des Messfehlers beim Ringpolygon

Geschlossenes Polygon:
Bei der fehlerfreien Messung eines geschlossenen Ringpolygons entspricht der letzte gemessene Punkt dem Startpunkt. In diesem Fall werden die Spaltensummen

$\sum_{i=1}^{A} d_{Y,i}$ und $\sum_{i=1}^{A} d_{X,i}$ zu null.

Der Gesamtfehler berechnet sich folglich:

$$E_{[X/Y]} = \sum_{i=1}^{A} d_{[X/Y],i}$$

Formel 6 Gesamtfehler geschlossenes Polygon

Um den Gesamtfehler streckenproportional auf alle Vektoren zu verteilen, wird die Teilfehlerkorrektur pro Vektor berechnet:

$$\Delta_{[X/Y],i} = \frac{E_{[X/Y]}}{\sum_{n=1}^{A} r_{HZ,n}} \cdot r_{HZ,i}$$

Formel 7 Teilfehlerkorrektur geschlossenes Polygon

Mehrfach angeschlossener Polygonzug:

Bei einer Geometrie vom Typ „mehrfach angeschlossener Polygonzug“, im Aequometer als „Linienzug mit mehreren Einhängepunkten“ bezeichnet, können beliebige Punkte gegeben sein. Eine Fehlerverteilung findet dann abschnittsweise zwischen je zwei bekannten Punkten statt. Diese sind hier mit $V_{1,[X/Y]}$ und $V_{2,[X/Y]}$ bezeichnet. Der gegebene oder angenommene Nullpunkt wird als erster gegebener Punkt behandelt.

Der Gesamtfehler $E_{[X/Y]}$ entspricht dem horizontalen und vertikalen Unterschied der gegebenen Koordinate V_2 und der gemessenen Koordinate in diesem Punkt. Er errechnet sich wie folgt:

$$E_{[X/Y]} = \left(V_{2,[X/Y]} - V_{1,[X/Y]}\right) - \sum_{i=V_1}^{V_2} d_{[X/Y],i}$$

Formel 8 Gesamtfehler mehrfach angeschlossener Polygonzug

Die Gesamtstrecke des Abschnitts ergibt sich dann aus der Summe Horizontaldistanzen der Punkte V_1 bis V_2.

$$G = \sum_{i=V_1}^{V_2} r_{Hz,i}$$

Formel 9 Gesamtstrecke des Abschnitts

Die Teilfehlerkorrektur wird wie folgt berechnet:

$$\Delta_{[X/Y],i} = \frac{E_{[X/Y]}}{G} \cdot r_{Hz,i}$$

Formel 10 Teilfehlerkorrektur mehrfach angeschlossener Polygonzug

2.10.6. Koordinatenberechnung

Polarverfahren:
Beim Polarverfahren wird der Instrumentenstandpunkt während der Messungen nicht verändert. Das Ergebnis ist folglich ein Vektorenbüschel mit identischen Fußpunkten. Daher entsprechen die endgültigen Koordinaten den in Abschnitt 2.10.4 berechneten orthogonalen Koordinatenunterschieden. Eine Fehlerverteilung findet nicht statt.

$$\vec{P}_i' = \vec{P}_i = \begin{pmatrix} d'_{Y,i} \\ d'_{X,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{Y,i} \\ d_{X,i} \end{pmatrix}$$

Formel 11 Koordinaten Polarverfahren

Polygonzug:
Das Messverfahren bedingt eine Verkettung von Vektoren. Um zu den endgültigen Koordinaten zu gelangen, werden die orthogonalen Koordinatenunterschiede aufsummiert. Bei freien oder nur einseitig angeschlossenen Polygonzügen, also bei den Aufnahmeverfahren offenes Polygon und Linienzug findet keine Fehlerverteilung statt.

$$\vec{P}_i' = \begin{pmatrix} d'_{Y,i} \\ d'_{X,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{i} d_{Y,k} \\ \sum_{k=1}^{i} d_{X,k} \end{pmatrix}$$

Formel 12 Koordinaten freier oder einseitig angeschlossener Polygonzug

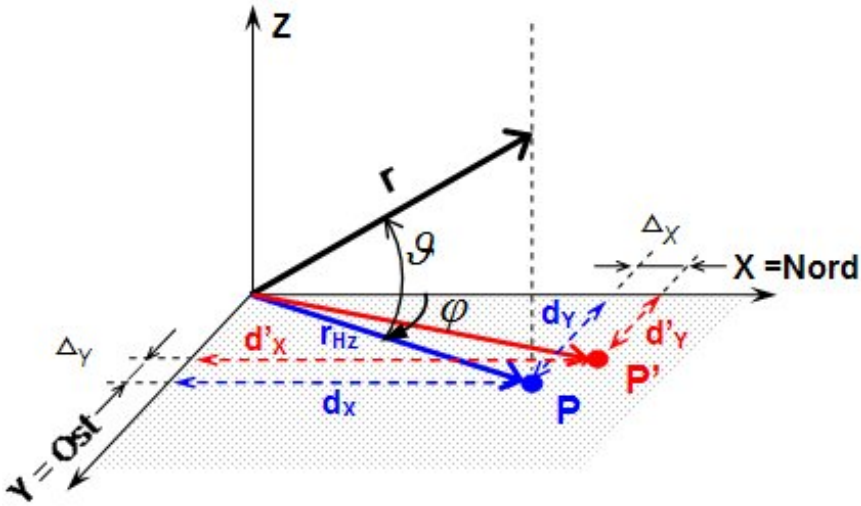


Abbildung 2.10-5 Koordinatenberechnung mit Fehlerverteilung

Beim mehrfach angeschlossenen Polygonzug und beim Ringpolygon muss zusätzlich noch die Teilfehlerkorrektur berücksichtigt werden.

$$\vec{P'} = \begin{pmatrix} d'_{Y,i} \\ d'_{X,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{i-1} d'_{Y,k} + d_{Y,i} - \Delta_{Y,i} \\ \sum_{k=1}^{i-1} d'_{X,k} + d_{X,i} - \Delta_{X,i} \end{pmatrix}$$

Formel 13 Koordinaten geschlossenes Polygon

2.10.7. Schlussvektor

Beim Verfahren „offenes Polygon“ wird der zum Ringschluss fehlende Vektor berechnet und angezeigt. Der Schlussvektor wird bezeichnet mit:

$$\vec{P}_A = \begin{pmatrix} d'_{Y,A} - d'_{Y,A-1} \\ d'_{X,A} - d'_{X,A-1} \end{pmatrix}.$$

Formel 14 Schlussvektor

Die **Länge** des Schlussvektors wird mit der Formel für den Abstand zweier Punkte also dem Satz des Pythagoras berechnet.

$$\left|\overrightarrow{P_A}\right| = \overline{P_{A-1}P_A} = \sqrt{(d'_{A,Y} - d'_{A-1,Y})^2 + (d'_{A,X} - d'_{A-1,X})^2}$$

Formel 15 Länge des Schlussvektors

Die **Richtung** des Schlussvektors wird mit Hilfe der Excel Funktion ARCTAN2 berechnet.

„Liefert den Arkustangens ausgehend von einer x- und einer y-Koordinate. Dieser Arkustangens ist der Winkel zwischen der x-Achse und der Linie, die durch den Koordinatenursprung (0; 0) und den Punkt verläuft, der die Koordinaten (**x_Koordinate**; **y_Koordinate**) hat. Der Winkel wird im Bogenmaß mit einem Wert zwischen -pi und pi (ausgenommen -pi) ausgegeben.

Syntax

ARCTAN2(**x_Koordinate**;**y_Koordinate**)

x_Koordinate ist die x-Koordinate des Punktes.

y_Koordinate ist die y-Koordinate des Punktes.

Anmerkung

- Ein positives Ergebnis entspricht einem Winkel, der bezogen auf die x-Achse gegen den Uhrzeigersinn abgemessen wird; ein negatives Ergebnis entspricht einem im Uhrzeigersinn abgemessenen Winkel.
- ARCTAN2(a;b) entspricht ARCTAN(b/a) mit dem Unterschied, dass a in ARCTAN2 den Wert 0 annehmen darf.
- Ist sowohl die x_Koordinate als auch die y_Koordinate 0, liefert ARCTAN2 den Fehlerwert #DIV/0!.
- Soll ein Arkustangens in Grad ausgedrückt werden, müssen Sie das jeweilige Ergebnis mit 180/PI( ) multiplizieren.“

Abbildung 2.10-6 Excel Hilfe zu ARCTAN2

Um Fehlerwerte zu vermeiden wird definiert, dass $ARCTAN2(0,0) := 0$ Dies hat keine Auswirkungen auf die Berechnung, da in diesem Fall $\left|\overrightarrow{P_A}\right| = 0$ gilt. Für den Fall dass das Ergebnis negativ wird, ist ein Vollkreis dazu zu zählen. Mit dem Index des Schlussvektors A ergibt sich für die Richtung des Schlussvektors φ_A :

$$\frac{\arctan2(d_{Y,A};d_{X,A})}{W_{Hz}} = \begin{cases} = 0, \text{ dann } \varphi_A := 0 \\ < 0, \text{ dann } \begin{cases} \varphi_A = 360° \quad + \arctan2(d_{Y,A};d_{X,A}) \cdot 1/W_{Hz}, \text{ wenn } \varphi \text{ in Grad} \\ \varphi_A = 400 \text{ Gon} + \arctan2(d_{Y,A};d_{X,A}) \cdot 1/W_{Hz}, \text{ wenn } \varphi \text{ in Gon} \end{cases} \\ > 0, \text{ dann } \varphi_A = \arctan2(d_{Y,A};d_{X,A}) \cdot 1/W_{Hz} \end{cases}$$

Formel 16 Richtung des Schlussvektors

2.10.8. Koordinaten der Zeichnung

Die gemessene Figur wird in einem Excel „XY Diagramm“ in einem Quadrat mit 10 cm Seitenlänge dargestellt. Die Achsen des Diagramms sind fest skaliert. Für die Zeichnung müssen daher abhängig vom Maßstab eigene Koordinaten berechnet werden. Ist kein Maßstab vorgegeben, so wird dieser so berechnet, dass die Figur genau in das vorgegebene Quadrat passt. Außerdem wird die Figur aus optischen Gründen in die Mitte des Diagramms gerückt.

Zur Ermittlung des günstigsten Maßstabes wird zunächst die maximale Erstreckung der Geometrie nach folgendem Schema ermittelt:

$$W_Y = Max(Nord) - Min(Nord)$$
$$W_X = Max(Ost) - Min(Ost)$$
$$W_{max} = \begin{cases} W_Y \text{ wenn } W_Y > W_X \\ W_X \text{ wenn } W_Y < W_X \end{cases}$$

Formel 17 Maximale Erstreckung

Der auf die Zeichnungsfläche optimierte Maßstab C ergibt sich aus der Erstreckung W_{max} multipliziert mit der Seitenlänge der Zeichnungsfläche d_Z.

$$C = \left(W_{\max} \cdot d_Z\right)$$

Formel 18 Maßstab

Um die Zeichnung in der Mitte des Darstellungsbereiches anzuzeigen, wird der Freiraum zwischen Figur und Rand der Zeichnungsfläche ermittelt. Mit den Seitenlängen des Diagramms L_X und L_Y die je 10 cm betragen gilt:

$$m_X = \frac{L_X}{2} - \frac{50E_X}{C}$$
$$m_Y = \frac{L_Y}{2} - \frac{50E_Y}{C}$$

Formel 19 Abstand zum Rand

Die Koordinaten für die Zeichnung berechnen sich dann wie folgt:

$$\tilde{d}_{Y,i} = \frac{d_{Y,i} + W_{\min,Y}}{C/100} + m_Y$$
$$\tilde{d}_{X,i} = \frac{d_{X,i} + W_{\min,X}}{C/100} + m_X$$

Formel 20 Koordinaten für die Zeichnung

Der Wert $W_{min(X/Y)}$ stellt jeweils den kleinsten Wert für die x- und y-Richtung dar. Die Addition dieses Wertes zu jedem Punkt verschiebt die Figur in den ersten Quadranten des Koordinatensystems.

2.10.9. Fläche

Bedingungen:
Zur Berechnung der Fläche des Polygons wird ein einfacher, geschlossener Polygonzug vorausgesetzt. Die Bedingungen hierfür sind:

- Die Kanten dürfen sich nicht schneiden, berühren oder überlappen.
- Der erste und der letzte Punkt müssen identisch sein
- Außer dem ersten und letzten Punkt dürfen keine zwei Eckpunkte identisch sein.
- Das Polygon muss mindestens 4 Punkte haben, was einem Dreieck entspricht.

Vektorprodukt

Die mathematische Grundlage der Berechnung ist das Kreuzprodukt zweier Vektoren. Dies lässt sich wie folgt definieren: Wobei α der von den beiden Vektoren eingeschlossene Winkel und $\vec{e}$ der zu den beiden Vektoren senkrecht stehende Einheitsvektor ist.

$$\overrightarrow{P'_{i-1}} \times \overrightarrow{P_i'} = \left|\overrightarrow{P'_{i-1}}\right| \left|\overrightarrow{P_i'}\right| \sin\alpha \bullet \vec{e}$$

Formel 21 Definition des Kreuzprodukts

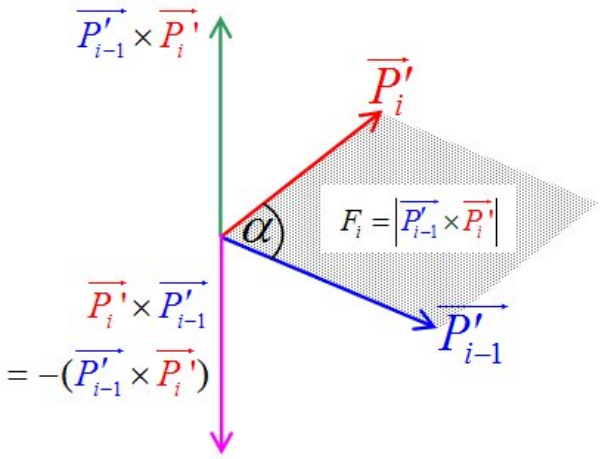


Abbildung 2.10-7 Vektorprodukt

Es entspricht $\left|\overrightarrow{P'_{i-1}} \times \overrightarrow{P_i'}\right|$ der Fläche des von $\overrightarrow{P'_{i-1}}$ und $\overrightarrow{P_i'}$ aufgespannten Parallelogramms. Für das Kreuzprodukt gilt das Kommutativgesetz nicht, bei Vertauschung der Vektoren ändert sich das Vorzeichen.

Flächenberechnung nach Gauß-Elling

Der Algorithmus zur Berechnung der Flächen aller Teilparallelogramme ist die Flächenformel nach Gauß-Elling:

$$F_i = d'_{y,i-1} \cdot d'_{x,i} - d'_{x,i-1} \cdot d'_{y,i}$$

Formel 22 Flächenformel nach Gauß-Elling

F_i ist hierbei die Fläche eines Teilparallelogramms. Der Algorithmus beginnt in der zweiten Zeile und wird bis A durchlaufen. In der letzten Zeile wird definitionsgemäß der erste Punkt wiederholt.

Berechnung der Gesamtfläche:

Die Summe der Flächen aller Teilparallelogramme entspricht der doppelten Fläche des Polygons. Das Vorzeichen ist positiv, wenn das Polygon im Uhrzeigersinn orientiert ist. Die Gesamtfläche F berechnet sich folglich zu:

$$F = \left| \sum_{i=1}^{A} \left(\frac{F_i}{2} \right) \right|$$

Formel 23 Gesamtfläche

2.10.10. Umfang oder Länge

Die berechneten Koordinaten können, bedingt durch die Fehlerverteilung, von den gemessenen Koordinaten abweichen. Der Umfang oder die Länge einer Geometrie werden deshalb aus den errechneten Koordinaten ermittelt. Es wird hierbei folgende Formel für den Abstand zweier Punkte verwendet:

$$U_i = \sqrt{(d'_{Y,i} - d'_{Y,i-1})^2 + (d'_{X,i} - d'_{X,i-1})^2}$$

Formel 24 Abstand zweier Punkte

Die Summe aller Teilstrecken ergibt den Umfang bzw. die Länge einer Geometrie:

$$U = \sum_{i=2}^{A+1} U_i$$

Formel 25 Umfang oder Länge

2.10.11. Längenfehler

Geschlossenes Polygon:
Die Berechnung des Gesamtfehlers in x- und y-Richtung wurde im Abschnitt 2.10.5 beschrieben. Die Länge des resultierenden Fehlervektors entspricht dem absoluten Längenfehler. Der Wert wird auf ganze Zentimeter gerundet und in Metern ausgegeben.

$$f_{L,abs} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{A} d_{Y,i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{A} d_{X,i}\right)^2}$$

Formel 26 $f_{L,abs}$ absoluter Längenfehler

Als relativer Längenfehler wird der Quotient aus dem absoluten Längenfehler und der Summe der Horizontaldistanzen bezeichnet.

$$f_{L,prz} = \frac{f_{L,abs}}{\sum_{i=1}^{A} r_{HZ,i}} \cdot 100\%$$

Formel 27 $f_{L,prz}$ relativer Längenfehler

Polarverfahren:
Eine Überprüfung der Messgenauigkeit ist beim Polarverfahren nur dann möglich, wenn zusätzlich Spannmaße aufgenommen wurden. Das berechnete Spannmaß entspricht dem Abstand zweier aufeinander folgender Messwerte und wird daher mit U_i bezeichnet. Das gemessene Spannmaß wird mit S_i bezeichnet. Die Differenz ist ein Maß für die Genauigkeit der Messung.

$$\Delta S_i = U_i - S_i$$

Formel 28 Differenz des berechneten und gemessenen Spannmaßes beim Polarverfahren

Das Fehlerprozent ist der Quotient dieser Differenz, im Verhältnis zur Gesamtlänge des Abschnitts.

$$f_{PGZ,i} = \left| \frac{\Delta S_i}{U_i} \right|$$

Formel 29 Fehlerprozent beim Polarverfahren

Als mittlerer Fehler wird beim Polarverfahren das arithmetische Mittel aller einzelnen Fehlerprozente bezeichnet.

$$f_{PGZ} = \overline{X}\left(f_{PGZ,i} \right)$$

Formel 30 Mittlerer Fehler Polarverfahren

Linienzug mit mehreren Einhängepunkten:
Die abschnittsweise ermittelten absoluten Längenfehler werden durch die Gesamtstrecke des Abschnitts geteilt, um den relativen Längenfehler zu erhalten. Der mittlere Fehler ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der relativen Längenfehler aller Abschnitte.

$$f_{LNX} = \overline{X}\left(\sum \frac{\sqrt{E_X{}^2 + E_Y{}^2}}{G} \right)$$

Formel 31 Mittlerer Fehler mehrfach angeschlossener Polygonzug

2.10.12. Flächenfehler

Bei der Messung eines geschlossen Polygons ist zwar der Längenabschlussfehler bekannt, nicht aber bei welchen Vektoren Messfehler in welcher Höhe aufgetreten sind. Der Flächenfehler, also die Differenz der gemessenen Fläche zur Fläche in der Realität, lässt sich daher

nicht direkt berechnen. Mit den drei im Folgenden gezeigten Möglichkeiten wurde versucht, den Flächenfehler zu schätzen.

Der als **Verbesserung** $f_{F,V}$ bezeichnete Wert ergibt sich aus der Differenz zwischen den Ergebnissen für die Fläche bei Berechnung nach den Methoden offenes Polygon (F_{PGO}) und geschlossenes Polygon (F_{PGG}). Dieser Wert kann als die Flächendifferenz interpretiert werden, die durch die streckenproportionale Fehlerverteilung hervorgerufen wird. Er ist abhängig von der Flächenform, sowie von der Länge und Orientierung des Schlussvektors.

$$f_{F,V} = \left| F_{PGO} - F_{PGG} \right|$$

Formel 32 $f_{F,V}$ Flächenfehler, „Verbesserung“

Dem als **Schätzer** bezeichneten Wert $f_{F,S}$ liegt das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz zu Grunde. Dieses erlaubt es, den Fehler eines Wertes zu bestimmen, der nicht direkt gemessen sondern aus mehreren, voneinander unabhängigen Messwerten berechnet ist.

Zur Berechnung des Flächenfehlers ist es notwendig, die Messunsicherheiten der Einzelmessungen zu kennen, was in der Praxis nicht der Fall ist. Aus diesem Grund wird der wahrscheinlichste Wert für die **Messunsicherheiten** aus dem Schlussvektor berechnet. Es wird hierfür angenommen, dass die Messunsicherheiten bei jeder Messung gleich hoch sind. Die absolute Messunsicherheit bei der Winkelmessung wird mit $\Delta\varphi$, die relative Unsicherheit bei der Längenmessung mit δr bezeichnet. Alternativ zur Schätzung, können die Messunsicherheiten auch vorgegeben werden. Dann entfällt der erste Teil unten angegebener Rechnung. Da der Abschlussfehler dann nicht in die Rechnung mit eingeht, ist das Ergebnis nur von der Form und Größe der Fläche abhängig. Die Berechnung mit definierten Messunsicherheiten wird im Folgenden als „Gaußsche Fehlerfortpflanzung“ bezeichnet.

In folgender Rechnung bezeichnet d die Summe der Einzelmessungen, also den Abschlussfehler, der nach 2.10.5 im Idealfall null wird. Mit d_i werden die in 2.10.4 beschriebenen orthogonalen Koordinatenunterschiede bezeichnet.

$$d = \sum_{i=1}^{A} d_i = \begin{pmatrix} \sum_{i=2}^{A} r_i \cdot \cos\varphi \\ \sum_{i=2}^{A} r_i \cdot \sin\varphi \end{pmatrix}$$

Formel 33 Entspricht Formel 5

Die Fehlerfortpflanzung ergibt für die Abweichung von d von seinem Erwartungswert null:

$$d_{X^2} = \left(\sum_{i=2}^{A} \left(\cos\varphi_i\right)^2 r_i^2 \right) \delta r^2 + \left(\sum_{i=2}^{A} \left(\sin\varphi_i\right)^2 r_i^2 \right) \Delta\varphi^2$$
$$d_{Y^2} = \left(\sum_{i=2}^{A} \left(\sin\varphi_i\right)^2 r_i^2 \right) \delta r^2 + \left(\sum_{i=2}^{A} \left(\cos\varphi_i\right)^2 r_i^2 \right) \Delta\varphi^2$$

Formel 34 Abweichung von d vom Erwartungswert 0

Aufgelöst nach $\Delta\varphi$ und δr und mit $A := \sum_{i=2}^{A} \left(\cos\varphi_i r_i\right)^2$ und $B := \sum_{i=1}^{A} \left(\sin\varphi_i r_i\right)^2$ ergeben sich:

$$\delta r^2 = \frac{A \cdot d_X^2 - B \cdot d_Y^2}{A^2 - B^2}$$
$$\Delta\varphi^2 = \frac{A \cdot d_Y^2 - B \cdot d_X^2}{A^2 - B^2}$$

Formel 35 geschätzte Messunsicherheiten, polar

Die absolute Messunsicherheit der Längenmessung Δr ergibt sich aus dem Produkt der relativen Messunsicherheit δr und der jeweiligen Streckenlänge.

Die Messunsicherheiten $d_{X,j}$ und $d_{Y,j}$ erhält man dann aus den Messgrößen r_j, φ_j, ϑ_j.

$$d_{Y,j} = r_j \cdot \cos\vartheta_j \sin\varphi_j$$
$$\Rightarrow \Delta d_{Y,j}{}^2 = \left(\cos\vartheta_j \sin\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta r_j{}^2 + \left(r_j \cdot \sin\vartheta_j \sin\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta\vartheta_j{}^2 + \left(r_j \cdot \cos\vartheta_j \sin\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta\varphi_j{}^2$$
$$d_{X,j} = r_j \cdot \cos\vartheta_j \cos\varphi_j$$
$$\Rightarrow \Delta d_{X,j}{}^2 = \left(\cos\vartheta_j \cos\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta r_j{}^2 + \left(r_j \cdot \sin\vartheta_j \sin\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta\vartheta_j{}^2 + \left(r_j \cdot \cos\vartheta_j \sin\varphi_j\right)^2 \cdot \Delta\varphi_j{}^2$$

Formel 36 geschätzte Messunsicherheiten, kartesisch

Sind $x_1, x_2, \ldots, x_A$ Messgrößen mit Messunsicherheiten $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_A$ und die Fläche $F(x_1, x_2, \ldots, x_A)$ eine Funktion dieser Messgrößen, dann ist die Unsicherheit von F nach der **Gaußschen Fehlerfortpflanzung**:

$$\Delta F = \sqrt{\sum_{i=1}^{A} \left(\left. \frac{\partial F}{\partial x_i} \right|_{x_1, x_2, \ldots x_A,} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2}$$

Formel 37 Gaußsche Fehlerfortpflanzung

Die Flächenberechnung im Aequometer erfolgt nach Formel 22, die auch wie folgt geschrieben werden kann:

$$
\begin{aligned}
F &= \frac{1}{2}\sum_{i=2}^{A} F_i \\
&= \frac{1}{2}\sum_{i=2}^{A}\left(d'_{Y,i-1}\cdot d'_{X,i} - d_{X,i-1}\cdot d'_{Y,i}\right) \\
&= \frac{1}{2}\sum_{i=2}^{A}\left(\left(\sum_{k=1}^{i-1} d_{Y,k}\right)\cdot\left(\sum_{k=1}^{i} d_{X,k}\right) - \left(\sum_{k=1}^{i-1} d_{X,k}\right)\cdot\left(\sum_{k=1}^{i} d_{Y,k}\right)\right)
\end{aligned}
$$

Formel 38 Flächenberechnung im Aequometer

Die partiellen Ableitungen hiervon sind:

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial F}{\partial d_{Y,j}} &= \frac{1}{2}\left(\sum_{i=j+1}^{A}\sum_{k=1}^{i} d_{X,k} - \sum_{i=j}^{A}\sum_{k=1}^{i-1} d_{X,k}\right) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{A} d_{X,k} - \sum_{k=1}^{j-1} d_{X,k} - \frac{d_{X,j}}{2} \\
\frac{\partial F}{\partial d_{X,j}} &= \frac{1}{2}\left(\sum_{i=j}^{A}\sum_{k=1}^{i-1} d_{Y,k} - \sum_{i=j+1}^{A}\sum_{k=1}^{i} d_{Y,k}\right) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{j-1} d_{Y,k} + \frac{d_{Y,j}}{2} - \sum_{k=1}^{A} d_{Y,k}
\end{aligned}
$$

Formel 39 Ableitungen der Flächenberechnung

Durch Einsetzen der Ergebnisse aus Formel 36 und Formel 39 in Formel 37 erhält man
Durch Anwendung von Formel 37 erhält man die aus den Messunsicherheiten resultierende Unsicherheit der Fläche:

$$
f_{F,S} = \Delta F = \sqrt{\sum_{j=2}^{A}\left(\frac{\partial F}{\partial d_{Y,j}}\right)^2 \cdot \Delta d_{Y,j}{}^2 + \sum_{j=2}^{A}\left(\frac{\partial F}{\partial d_{X,j}}\right)^2 \cdot \Delta d_{X,j}{}^2}
$$

Formel 40 Unsicherheit der Fläche nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung

3. Material und Methoden

3.1. Flächen im Kranzberger Forst

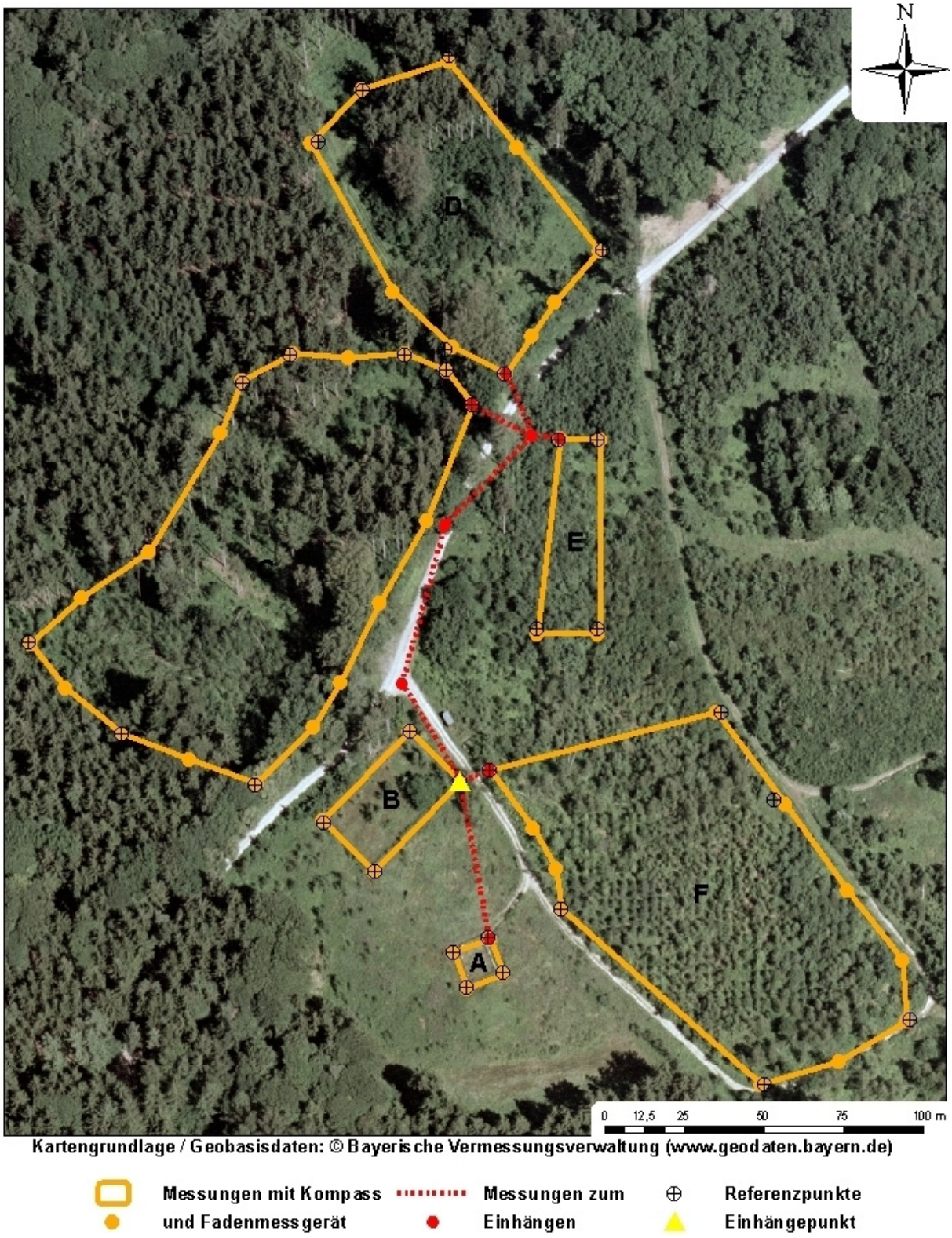


Abbildung 3.1-1 Polare Aufnahmen im Kranzberger Forst

3.1.1. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet „Kranzberger Forst“ liegt im Tertiären Hügelland etwa vier Kilometer westlich von Freising im Staatswald, an der Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Für die Wahl dieses Untersuchungsgebietes sprachen neben der Nähe zur Fachhochschule zwei weitere Kriterien. Zum einen weisen je zwei der sechs gemessenen Flächen die Bestandesverhältnisse Freifläche, Dickung und Altholz auf und repräsentieren damit typische Verhältnisse bei der Vermessung im Forst. Zum anderen liegen bereits ein Forschungsbericht von HAMBERGER (2001) sowie die Diplomarbeit von HOFFMANN (2005) vor, die sich beide mit der Vermessung der untersuchten Flächen beschäftigen. Die von HAMBERGER (2001) verwendeten Zäune sind bereits teilweise abgebaut und wurden daher von HOFFMANN (2005) neu verpflockt. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Vergleichbarkeit der behandelten Flächen.

Tabelle 3-1 Vergleichbarkeit mit vorliegenden Arbeiten

Bezeichnung	**Bestandes-verhältnisse**	**Vergleich mit HAMBERGER (2001)**			**Vergleich mit HOFFMANN (2005)**		
		Bez.	**Bestandes-verhältnisse**	**Lage**	**Bez.**	**Bestandes-verhältnisse**	**Lage**
Fläche A	Freifläche	Klimazaun	vergleichbar	identisch	6000	vergleichbar	identisch
Fläche B	Freifläche	Kranzberg Zaun 5	vergleichbar	identisch	5000	vergleichbar	identisch
Fläche C	Fi- Altholz mit Lbh.-Vjg.	Kranzberg Zaun 4	vergleichbar, Fi.-Vjg. dichter	ähnlich	4000	vergleichbar	Eckpunkte identisch
Fläche D	Fi- Altholz mit Lbh.-Vjg.	Kranzberg Zaun 3	vergleichbar	ähnlich	3000	vergleichbar	Eckpunkte identisch
Fläche E	Lbh. Dickung mit einzelner Fi.-Vjg.	Kranzberg Zaun 2	nur bedingt vergleichbar, da Dickung viel dichter geworden	ähnlich	2000	vergleichbar	Eckpunkte identisch
Fläche F	Lbh Dickung mit einzelner Fi.-Vjg.	Kranzberg Zaun 1	wie Fläche E	ähnlich	1000	vergleichbar	Ein Pfosten nicht auffindbar, dieser wurde nicht berücksichtigt.

3.1.2. Referenzkoordinaten

Zur Ermittlung der Lageabweichung der Eckpunkte sind Referenzkoordinaten notwendig. Da die aufgenommenen Flächen nicht mit denen von HAMBERGER (2001) identisch sind, konnte nicht auf die mit dem Tachymeter ermittelten Koordinaten zurückgegriffen werden.

HOFFMANN (2005) verwendete zum Abstecken der Zäune das GPS-Gerät der High-End Klasse „Leica GS 50“ in Verbindung mit einem GSM-Modem zum Empfang des Korrekturdatendienstes „ascos“ der Firma Ruhrgas. Als PDOP Grenze wurde vier festgelegt. Für diese Konfiguration wurde eine Lagegenauigkeit von mindestens 50 cm zugesichert. Dies wurde von HOFFMANN (2005) mit Hilfe der Software GisData Pro 2.1 überprüft und bestätigt.

Diese Koordinaten wurden den Auswertungen dieser Diplomarbeit als Referenzdaten zugrunde gelegt. Aus den Shapedateien von Hoffmann wurde mit der Software Shape Viewer eine Koordinatenliste in Excel erzeugt. Diese wurde manuell in den Aequometer kopiert und für die weiteren Auswertungen verwendet.

3.1.3. Beschreibung der Flächen und Messverfahren

Alle Flächen im Kranzberger Forst wurden vom Autor im Ein-Mann-Verfahren aufgenommen. Als Messgerät für die Winkelmessung wurde ein Handkompass mit Prisma-Peilvorrichtung und integriertem Neigungsmesser „System Wilkie“ verwendet. Für die Aufnahme nach dem Polarverfahren an Fläche B kam eine Forstbussole von Typ TFB des Herstellers Ertel zum Einsatz. Es handelt sich um eine Vollkreisbussole mit exzentrischem Fernrohr und Höhenkreis. Die Strecken wurden jeweils mit einem Fadenmessgerät „Fieldranger“ und einem Ultraschalldistanzmessgerät „Vertex III“ gemessen. Das zum Zeitpunkt der Aufnahme leicht regnerische Wetter erlaubte keine genaue Messung mit Laserentfernungsmessgeräten, so dass auf diese Geräteklasse verzichtet wurde. Die Winkel wurden in einem Messgang erhoben, die Strecken mit beiden Messgeräten gemessen.

Die **Fläche A** wird vom Zaun der Waldklimastation begrenzt. Sie liegt auf einer Freifläche auf einem leichten Hang, die Fläche selbst ist nahezu eben. Die Form ist quadratisch mit einer Seitenlänge von 12 Metern. Innerhalb der Fläche befinden sich metallische Apparaturen, der Zaun selbst ist auch aus Metall. Mit magnetischen Vermessungsgeräten ist eine Peilung innerhalb und direkt am Zaun aufgrund der resultierenden Deviation nicht möglich, was die Anwendung des Polarverfahrens mit zentraler Aufstellung ausschließt. Daher wurde die Fläche als geschlossener Polygonzug aufgenommen. Die Fluchten der Seiten wurden in Verlängerung der Strecke hinter dem Zaun aufgenommen.

Die **Fläche B** ist eine Beobachtungsfläche für geklonte Baum- und Straucharten entsprechend den Kriterien der Internationalen Phänologischen Gärten. Sie liegt in der Ebene und ebenfalls auf Freifläche. Die Ausformung ist rechteckig, etwa 20 m auf 40 m. Der Zaun selbst ist auf einer Seite von übermannshohen Sträuchern umwachsen, was die direkte Peilung von Pfosten zu Pfosten unmöglich macht. Innerhalb des Zaunes stehen einige junge Bäume von etwa 5 m Höhe und vereinzelt aufkommende Naturverjüngung. Von einem in der Fläche zentral gelegenen Punkt aus sind jedoch alle Eckpfosten sichtbar. Für die Aufnahme als geschlossener

Polygonzug mussten die Messpunkte von den Positionen der beiden Eckpunkte an der stark bewachsenen Zaunseite parallel versetzt werden, um eine Peilung vornehmen zu können. Die Konstruktion der Hilfspunkte zur Peilung gestaltete sich vergleichsweise einfach, da die Zaunseiten nahezu parallel sind und daher die Eckpunkte einfach je zwei Meter nach innen entlang des Zaunes versetzt werden konnten. Die dadurch entstehende Ungenauigkeit liegt im Rahmen der Messgenauigkeit und kann in Kauf genommen werden. Die Messung der Strecken erfolgte innerhalb des Zaunes, direkt am Zaun bzw. parallel dazu. Weil von einem zentralen Punkt aus alle Eckpunkte einsehbar sind, wurde diese Fläche zusätzlich nach dem Polarverfahren mit zentraler Aufstellung vermessen. Hierbei fand zusätzlich eine Messung mit dem Bandmaß statt, das am Gerätestandpunkt mit einem Häring fixiert war. Somit war eine Messung mit dem Bandmaß im Ein-Mann-Verfahren möglich.

Die **Flächen C und D** sind mit Fichte im Altholzstadium bestockt. Auf Teilen der Fläche wächst Laubholzverjüngung mit einer Höhe von über zwei Metern. Beide Flächen sind leicht geneigt und haben eine unregelmäßige, grob rechteckige Ausformung. Die Fläche C ist ungefähr einen Hektar groß, Fläche D misst etwa einen halben Hektar. Beide Flächen wurden als geschlossener Polygonzug aufgenommen. Da die markierten Eckpunkte der Fläche relativ weit auseinander liegen, besteht zwischen den meisten Eckpunkten keine direkte Sichtverbindung. Daher war es notwendig Hilfspunkte festzulegen, die die Eckpunkte verbinden. Es wurde nicht versucht eine exakte Flucht zwischen den gegebenen Eckpunkten herzustellen. Vielmehr erfolgte die Orientierung an örtlichen Merkmalen wie dem Bestandesrand. Diese für die Messung notwendigen Hilfspunkte mussten nachträglich entfernt werden, um die Figur mit der Referenzfläche vergleichbar zu machen.

Die **Flächen E und F** sind Teil des Landesarboretums Kranzberger Forst. Sie sind mit einer Laubholzdickung bestockt, die zum Zeitpunkt der Messung etwa 13 Jahre alt war. Einzeln aufkommende Fichten-Naturverjüngung erschwert die Messung zusätzlich.

Die **Fläche E** ist ein Viereck mit Seitenlängen von etwa 10 m, 60 m, 12 m und 60 m. Die kürzeste Seite liegt im Norden. Die lange Seite im Osten war zum Zeitpunkt der Messung ausgemäht und deshalb gut einsehbar. An den beiden kurzen Seiten war eine Peilung trotz des dichten Bewuchses möglich. Die lange Seite im Westen ist so stark umwachsen, dass ein Durchblick von Pfosten zu Pfosten nur durch ein Freischneiden des Zaunes erreichbar gewesen wäre. Daher wurde die Fläche als offener Polygonzug aufgenommen. Die nicht einsehbare Seite wurde nicht erhoben, sondern bei der Auswertung errechnet. Eine Messung mit dem Ultraschalldistanzmessgerät war an den kurzen Seiten aufgrund des dichten Bewuchses nicht möglich. Da mehrere Messversuche kein akzeptables Ergebnis lieferten, wurde auf diese Messung verzichtet.

Die **Fläche F** ist unregelmäßig, grob rechteckig ausgeformt und hat eine Größe von etwa 0,8 ha. Drei Seiten grenzen an einen Rückeweg an, der jedoch nicht die Grenze der abge-

steckten Fläche markiert. Die Seite, die nicht an einen Weg grenzt, hat eine ungefähre Länge von 70 m. Auf dieser Strecke ist ein freier Durchblick wegen des dichten Bewuchses nicht gegeben. Eine Peilung auf dieser Strecke hätte das Freischneiden einer Schneise entlang der Grenze erfordert, da auch eine abschnittsweise Messung nicht möglich war. Daher wurde die Aufnahme als offener Polygonzug durchgeführt. An der Seite im Nordosten war der mittlere Pfosten nicht auffindbar und wurde daher nicht erfasst. Wie schon bei den Flächen C und D mussten Hilfspunkte zwischen Eckpunkten ohne direkte Sichtverbindung festgelegt werden. Die Position der Hilfspunkte wurde den örtlichen Gegebenheiten entsprechend gewählt.

3.1.4. Einhängen in das Landeskoordinatennetz

Um die Flächen in das Landeskoordinatennetz einhängen zu können wurde ein bekannter Eckpunkt der Fläche B verwendet, nämlich B1, der auch als Referenzpunkt R1 bezeichnet wird. Die Koordinaten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Streifen 4 wurden von HOFFMANN (2005) bereitgestellt. Die Fläche B kann damit direkt ins Landeskoordinatensystem eingehängt werden. Für die Aufnahmen nach dem Polarverfahren ist der Instrumentenstandpunkt als Referenzpunkt der Fläche anzugeben. Dieser kann, da ein Eckpunkt bekannt ist, aus den Messwerten berechnet werden. Um nun sämtliche Flächen miteinander zu verbinden, wurden folgende Messungen vorgenommen: Zunächst wurde vom Punkt R1 direkt zum Punkt A1 und F1 gemessen, wodurch die Flächen A und F eingehängt wurden. Zum Einhängen der Flächen C, D, und E wurde ein Hilfspunkt R2 definiert, von dem aus je ein Punkt dieser Flächen sichtbar war. Von R2 aus wurden die Vektoren zu den Startpunkten der Flächen mit dem Polarverfahren gemessen. Die Punkte R1 und R2 wurden über einen freien Linienzug verbunden.

3.1.5. Auswertung der Messergebnisse

Die aufgenommenen Messwerte wurden tabellarisch notiert und mit dem Aequometer ausgewertet. Den größten Abschlussfehler wies mit 2,3 % die Fläche D auf. Die Messgenauigkeit wird als ausreichend gewertet. Bei den Flächen E und F kann aufgrund des Messverfahrens als offenes Polygon keine Aussage über die Messgenauigkeit getroffen werden. Das Ergebnis der Auswertungen sind die Koordinaten der Eckpunkte, die Flächengröße und der Umfang.

3.1.6. Flächen ohne Hilfspunkte

Bei der Messung wurden Hilfspunkte gesetzt, die nicht in der Flucht zwischen zwei durch Pflöcke vermarkten Punkten liegen. Um die gemessenen Flächen mit den Referenzflächen vergleichbar zu machen, wurden die Hilfspunkte nachträglich entfernt. Bei den Flächen A, B und E war das nicht notwendig, da hier keine zusätzlichen Punkte vermessen wurden. Das Entfernen der Hilfspunkte erfolgte in der Koordinatenliste aus dem Aequometer. Diese wurde

in einem gesonderten Tabellenblatt bearbeitet und anschließend wieder in den Aequometer kopiert.

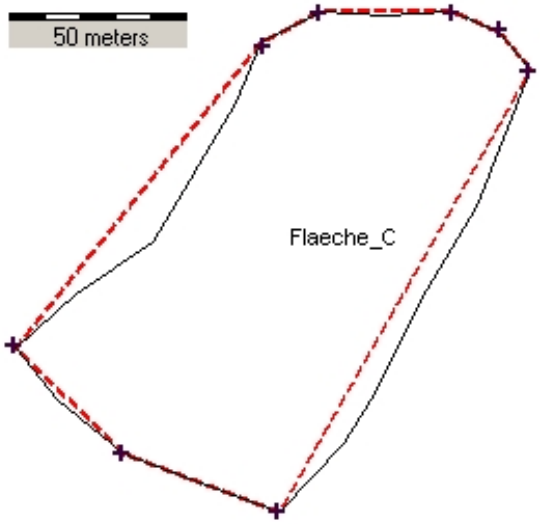


Abbildung 3.1-2 Fläche mit und ohne Hilfspunkte

3.1.7. Lagetreue der Punkte

Um die Lagetreue der Punkte zu ermitteln wurden die Koordinaten der gemessenen Flächen mit denen der Referenzflächen verglichen. Die Differenzen der Koordinaten ergeben die Lagefehler in x- und y-Richtung. Aus diesen orthogonalen Lagefehlern wurde dann mit dem Satz des Pythagoras die Länge des Fehlervektors ermittelt. Dieser wird im Folgenden als Lagefehler bezeichnet. Die statistischen Lageparameter wurden getrennt nach Messgerätekombination und Flächen als Box-Whisker-Plots dargestellt.

3.1.8. Längen- und Flächentreue

Um die Längen- und Flächentreue auszuwerten, wurden die gemessenen Werte mit den Referenzflächen verglichen. Die Differenzen der Flächen und Umfänge ergeben den realen Flächenfehler $f_{F,real}$ und den realen Längenfehler $f_{L,real}$. Um die Absolutwerte miteinander vergleichbar zu machen werden diese ins Verhältnis zur Referenzfläche gesetzt und prozentual ausgedrückt.

3.1.9. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lagetreue

Um die Lagetreue der Punkte vor und nach der streckenproportionalen Fehlerverteilung zu untersuchen wurden diese Werte miteinander und mit den Referenzkoordinaten verglichen. Dies erfolgte zunächst optisch. Die errechneten Fehlerwerte wurden in Excel als überhöhte Fehlerindikatoren in x- und y-Richtung dargestellt. Zusätzlich wurden die Flächen mit Hilfe des kostenfreien GIS-Systems „fgis“ dargestellt und verglichen.

Für den rechnerischen Vergleich wurden die realen Fehler vor und nach streckenproportionaler Fehlerverteilung aufsummiert. Das Verhältnis dieser Summen gibt Auskunft über die mittlere Auswirkung der streckenproportionalen Fehlerverteilung auf die Lagetreue.

Da das Ergebnis eine Verbesserung nach der Fehlerverteilung vermuten lässt, wurde diese Hypothese mittels schließender Statistik überprüft. Hierzu wurde die Statisik-Software „SAS“ verwendet. Als Testverfahren wurde „two sample paired t-test for means“ gewählt, also ein t-Test für verbundene Stichproben auf Mittelwerte. Das Signifikanzniveau alpha wurde auf 5 % festgelegt. Die Nullhypothese wurde formuliert als: „Mittelwerte von (PGO - PGG) ≤ 0“. Folglich lautet die Alternativhypothese: „Mittelwerte von (PGO - PGG) > 0“. Hierbei wurden der Lagefehler vor streckenproportionaler Fehlerverteilung als „PGO“ und der Lagefehler nach Fehlerverteilung als „PGG“ bezeichnet. Da der errechnete t-Wert deutlich größer ist als der Tabellenwert, ist die Nullhypothese zu verwerfen. Folglich sind die Mittelwerte der Lagefehler nach streckenproportionaler Verteilung des Abschlussfehlers niedriger.

3.2. Punkte im Kranzberger Forst

Eine weitere untersuchte Messung im Kranzberger Forst wurde von Nina Wipfler und Bernd Mazzolini durchgeführt. Ziel der Aufnahme war es, 198 mit Nummern markierte Bäume auf einer Versuchsfläche lagerichtig in eine Karte einzuzeichnen. Die gesamte Fläche hat eine Größe von etwa 200 m auf 300 m. Ein Zentroid von etwa 60 m mal 60 m Seitenlänge enthält keine aufzunehmenden Punkte. Die Vermessung wurde im Zwei-Mann-Verfahren mit Handkompass und Bandmaß durchgeführt. Als Aufnahmeverfahren wurde eine Kombination aus geschlossenem Polygonzug und Polarverfahren gewählt. Zunächst wurde um das Zentroid ein geschlossener Polygonzug mit 17 Aufnahmepunkten gelegt. Die Eckpunkte wurden als Instrumentenstandpunkt für weitere Messungen nach dem Polarverfahren verwendet. So konnten 101 weitere Punkte eingemessen werden. Die übrigen 97 Punkte im Außenbereich wurden wieder als geschlossener Polygonzug erhoben. Die beiden Polygonzüge wurden durch eine zusätzliche Messung miteinander verbunden. Dadurch ist der Anschluss der gesamten Geometrie an das Landeskoordinatensystem hergestellt. Die Messung erfolgte nach Aussage der Messenden mit einem geringen Zeitaufwand von wenigen Stunden.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte anhand eines vorbildlichen Messprotokolls mit dem Aequometer. Zunächst wurden die geschlossenen Polygone ausgewertet und anhand eines bekannten Punktes in das Landeskoordinatensystem eingehängt. Aus der Koordinatenliste wurden jene Punkte kopiert, die als Instrumentenstandpunkt für die Messungen als zentrale Aufstellungen dienten. Diese wurden in einem weiteren Schritt eingegeben und ausgewertet. Nach dem Vorliegen aller Ergebnisse wurden alle Punkte in einer Shapedatei gespeichert und in GIS-Systemen weiter verarbeitet.

3.3. Flächen in Hohenschäftlarn

3.3.1. Untersuchungsgebiet

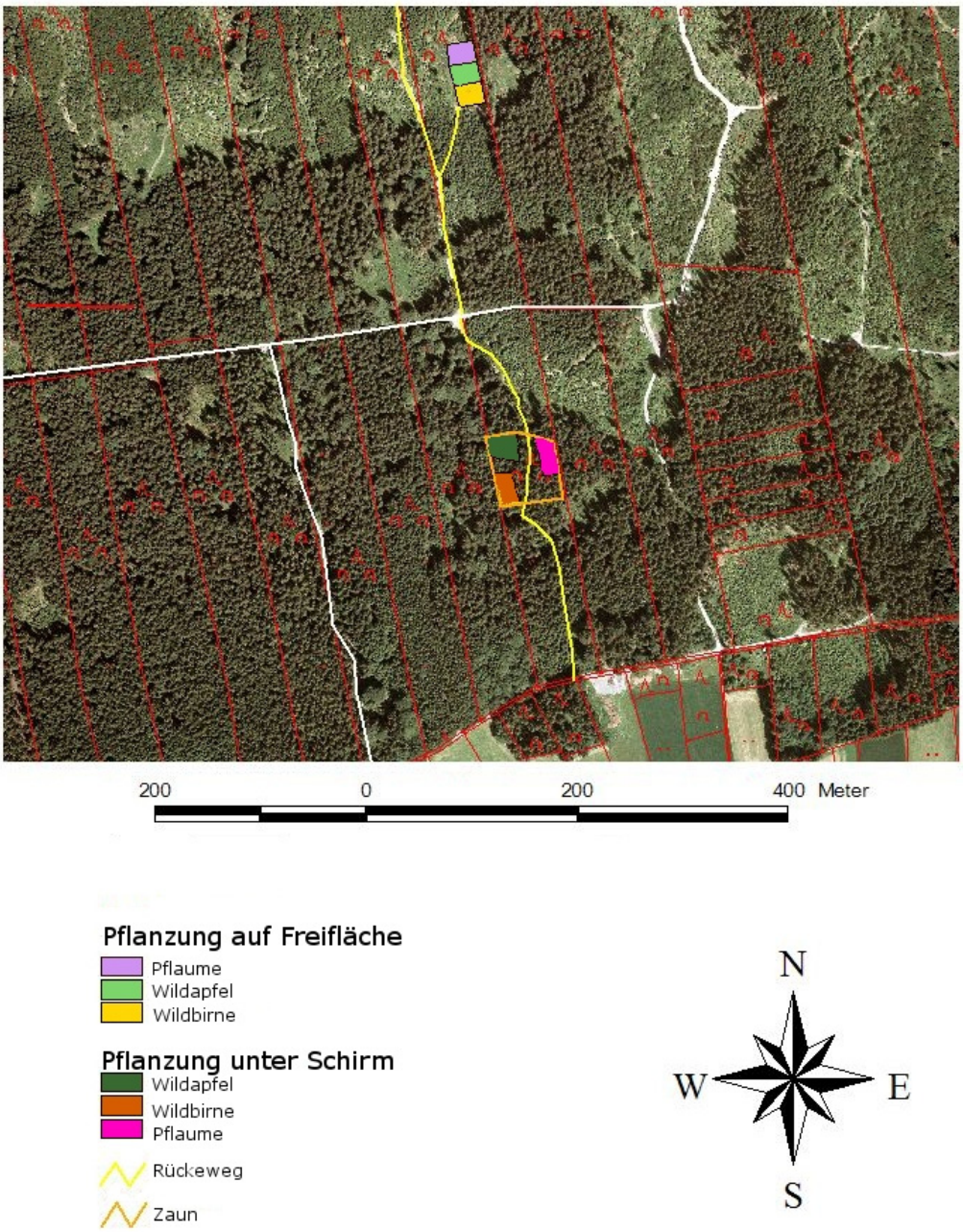


Abbildung 3.3-1 Flächen in Hohenschäftlarn

Das Untersuchungsgebiet „Hohenschäftlarn“ befindet sich in ebener Lage auf einer Altmoräne zwischen Baierbrunn und Hohenschäftlarn in den so genannten „Langen Hölzern“, im Privatwald. Im Rahmen der Diplomarbeit von Olaf RAHM (2005) wurden auf sechs Flächen die Wildobstsorten Wildapfel, Wildbirne und Pflaume je einmal unter Freiflächenbedingungen und einmal unter Schirm gepflanzt. Die beiden Pflanzungen sind etwa 300 m voneinander entfernt. Zum Zeitpunkt der Messung waren die Zäune bereits angelegt und die Pflanzung abgeschlossen.

Ziel der Vermessung war die Ermittlung der Flächengrößen und der Lage der Flächen in der Karte. Außerdem wurde eine Zeitstudie für die vorliegende Diplomarbeit durchgeführt. Die Messungen wurden mit einem Handkompass „System Wilkie“ und einem Fadenmessgerät „Fieldranger“ aufgenommen. Neben dem Autor war Dipl. Ing. Olaf Rahm an der Messung beteiligt.

3.3.2. Beschreibung der Flächen und Messverfahren

Die **Freifläche** entstand durch Räumung eines mit Borkenkäfer befallenen Restbestandes. Die entstandene Wiederaufforstungsfläche war zum Zeitpunkt der Messung bereits weitgehend vergrast. Aufkommende Fichten-Naturverjüngung innerhalb der Fläche wurde vor der Pflanzung entnommen. Außerhalb des Zaunes reichte teils übermannshohe Vegetation bis fast an den Zaun heran, was das Messen und Laufen um den Zaun herum erschwerte. Der Zaun selbst war jedoch nicht umwachsen. Die drei Pflanzflächen sind je etwa 500 m² groß mit einer Seitenlängen von ca. 20 m und 25 m. Sie liegen direkt nebeneinander entlang der Eigentumsgrenze und sind durch einen gemeinsamen Zaun geschützt. Die gesamte Zaunfläche wurde als geschlossener Polygonzug aufgenommen. Die Messpunkte wurden so gelegt, dass für die spätere Auswertung eine Abgrenzung der Teilflächen ermöglicht wurde. Hierdurch wurde ein Begehen der Fläche vermieden und die Laufwege minimiert.

Die eingezäunte **Fläche unter Schirm** ist unregelmäßig, annähernd rechteckig ausgeformt, mit Kantenlängen von etwa 60 m auf 70 m. Der im Mittel geschlossene Schirm ist ein Fichten-Reinbestand im Alter von 80 bis 100 Jahren. Die drei Pflanzflächen befinden sich an den Ecken des Zaunes, eine Baumlänge voneinander entfernt. Sie haben eine rechteckige Form und eine Fläche von je ca. 500 m^2. Die Grenzen der Pflanzflächen sind durch Pflöcke an den Eckpunkten temporär vermarkt. Die eingezäunte aber nicht bepflanzte Fläche soll der zu erwartenden Buchen-Naturverjüngung dienen. Die Vermessung der Flächen erfolgte als geschlossener Polygonzug. Die Flächen wurden nacheinander in vier getrennten Messungen aufgenommen.

3.3.3. Einhängen in das Landeskoordinatennetz

Um die Flächen in das Landeskoordinatensystem einzuhängen wurde sowohl für die Freifläche als auch für die Flächen unter Schirm je ein eindeutig identifizierbares Grenzzeichen aufgesucht. Ihre Koordinaten wurden aus der digitalen Flurkarte im Gauß-Krüger-Koordinatensystem entnommen. Da kein direkter Sichtkontakt zwischen dem ersten Grenzzeichen und der Freifläche bestand, wurde diese mittels eines Linienzuges über einen Hilfspunkt angeschlossen. Das andere Grenzzeichen liegt direkt neben einem Eckpunkt der Zaunfläche unter Schirm, so dass diese mit nur einer Messung angeschlossen werden konnte. Die Pflanzflächen innerhalb des Zaunes wurden durch je eine weitere Messung direkt eingehängt.

3.3.4. Zeitstudie

Alle Messarbeiten wurden im Ein-Mann-Verfahren durchgeführt, wobei die zweite Person fortlaufend die Zeit notierte. Als ein Arbeitsabschnitt wurden alle Tätigkeiten zusammengefasst, die für das Aufnehmen eines Punktes notwendig sind. Die Zeiten wurden stets in dem Moment festgehalten, in dem die Messung für einen Punkt abgeschlossen war und die Messergebnisse im Feldriss notiert wurden. Eine weitere Zergliederung der Arbeitsabschnitte wurde nicht als zweckmäßig angesehen, da das Ziel der Zeitstudie nicht die Herleitung von Vorgabezeiten, sondern die Vergleichbarkeit mit anderen Messverfahren ist. Persönlich bedingte Verteilzeiten und die zum Aufsuchen der Punkte notwendigen Zeiten wurden gesondert erfasst. Der Messende tauschte nach Abschluss einer kompletten Fläche mit dem Zeitnehmer, um die Arbeit ergonomisch zu gestalten und den Einfluss von personell bedingten Faktoren zu minimieren.

3.3.5. Berechnung der Teilflächen

Die drei Pflanzflächen auf der Freifläche sind durch einen gemeinsamen Zaun umgrenzt und wurden als eine Geometrie aufgenommen. Daher wurde die separate Berechnung der Teilflächen notwendig. Es wurden alle Eckpunkte erfasst, daher konnten sowohl die Gesamtfläche als auch die obere und untere Teilfläche direkt im Aequometer ermittelt werden. Für die Berechnung der Schlussvektoren, die ja bei den Teilflächen nicht erhoben wurden, wurde das Berechnungsverfahren offenes Polygon gewählt. Die Größe der Teilfläche in der Mitte kann nicht direkt im Aequometer berechnet werden, da hier zwei Vektoren fehlen. Sie ergibt sich jedoch aus der Differenz aus Gesamtfläche und den beiden anderen Teilflächen.

3.3.6. Darstellung

Die graphische Aufbereitung der Daten erfolgte mit der Software ArcGIS von ESRI. Diese wurde im EDV-Raum der Fachhochschule Weihenstephan genutzt. Die vom Aequometer erzeugten Shapedateien wurden mit einem Luftbild und der digitalen Flurkarte hinterlegt und dargestellt. Ferner wurden die Zufahrtswege digitalisiert und optisch hervorgehoben. Es wurden weiterhin eine Legende, ein Nordpfeil und eine Maßstabsleiste eingebunden. Abbildung 3.3-1 zeigt die fertige Darstellung.

3.4. Externe Messungen

3.4.1. Herkunft der Daten

Bei der Entwicklung des Aequometers entstand der Kontakt zu mehreren bayerischen Revierleitern, die Anregungen zur Verbesserung des Aequometers für den Einsatz in der Praxis gaben. Um Daten aus der Praxis zu erhalten bat er Autor diese Personen darum, verschiedene der von ihnen vermessenen Polygone einzusenden. Von fünf Förstern wurden die Messdaten von insgesamt 173 in der forstlichen Praxis vermessenen Flächen bereitgestellt. Es handelt sich zumeist um förderfähige Kulturflächen, deren Flächengröße es zu ermitteln galt. Bei einem Teil der Daten sind Angaben zu den jeweiligen Bestandesverhältnissen vorhanden. Eine Person stellte zusätzlich die Auswertungsergebnisse des Programms „Fläche 1.0“ zur Verfügung.

3.4.2. Auswertung

Für die Auswertung wurden nur die 168 Flächen berücksichtigt, die als geschlossener Polygonzug aufgenommen wurden. Nur bei diesem Messverfahren liegen berechnete Fehlerwerte vor. Weiterhin wurden sechs Flächen entfernt, deren Größe über vier Hektar lag, um die statistische Auswertung nicht zu verzerren. Die Messungen wurden aus datenschutzrechtlichen Gründen anonymisiert indem die Namen der aufnehmenden Personen durch Nummern ersetzt wurden. Für die Anzahl der Eckpunkte, der Flächengröße, des Umfangs und des Längenfehlers wurden die statistischen Lageparameter über alle Flächen ermittelt. Diese Werte sollen einen Anhaltspunkt geben, in welchem Bereich die in der Praxis gemessenen Flächen liegen. Weiterhin wurden klassifizierte Häufigkeitsdiagramme erstellt, um die Verteilung der Werte zu untersuchen.

3.4.3. Vergleich der Flächengrößen in „Fläche 1.0“ und Aequometer

Das Programm „Fläche 1.0“ ist ebenfalls von der bayerischen Staatsregierung für die förderrelevante Flächenermittlung von Kulturflächen im Forst zugelassen. Es liegen 27 Flächen vor, die mit diesem Programm ausgewertet wurden. Die Ergebnisse für die Flächengrößen wurden mit den im Aequometer berechneten Werten verglichen. Sowohl für die Berechnung als offene Polygone, als auch die für geschlossenen Polygone wurden zunächst die absoluten Flächendifferenzen gebildet. Der Quotient aus diesen und den im Aequometer berechneten Flächen ergibt die relativen Flächendifferenzen. Von diesen Werten wurden die statistischen Lageparameter ermittelt. Vorhandene Ausreißer wurden eingehender betrachtet. Außerdem wurde mit den Absolutwerten eine Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt und auf Signifikanz getestet.

3.5. Simulierte Flächen

3.5.1. Zweck der Simulation

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit Fragestellungen, die statistisch nur dann ausgewertet werden können, wenn genügend polare Aufnahmen mit bekannten Referenzkoordinaten vorliegen. Die Anzahl der im Kranzberger Forst erhobenen Flächen ist hierfür nicht ausreichend. Um weitere umfangreiche Außenaufnahmen zu vermeiden, wurden Messungen simuliert. Die als „Simulierte Flächen“ bezeichneten Daten entstammen einem Algorithmus, der mit einem Zufallsgenerator arbeitet. Dieser ist der Realität nachempfunden.

3.5.2. Erzeugung der Zufallspolygone

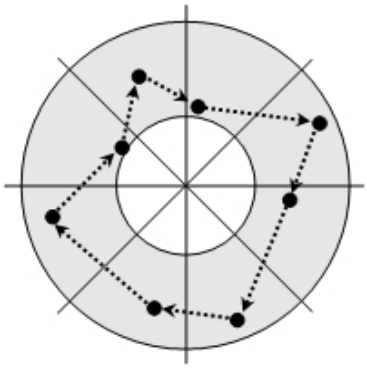


Abbildung 3.5-1 Zufallspolygon

Als erster Schritt der Simulation wurden zufällige Polygone generiert, die als bekannte Sollfläche dienen. Die Polygone wurden zunächst ähnlich dem Messverfahren der zentralen Aufstellung erzeugt. Ein Vollkreis wurde in acht Sektoren von je 45 Grad unterteilt. In jedem Sektor wurde ein Punkt mit zufälliger Lage generiert. Die Lage des Punktes definiert sich durch den Winkel, ausgehend vom Anfangspunkt des ersten Sektors und dem Abstand vom Mittelpunkt des Kreises. Hierzu wurden mit dem VBA Zufallszahlengenerator gleichverteilte Zufallszahlen erzeugt. Für die Winkel können diese minimal den Anfangswinkel und maximal den Endwinkel des jeweiligen Sektors annehmen. Für die Strecken wurden gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 15 und 90 erzeugt. Die Neigung wurde in diesem Verfahren nicht berücksichtigt, es wird ebenes Gelände simuliert. Die Koordinaten der resultierenden Punkte wurden berechnet und in Vektoren umgewandelt, so dass sich ein geschlossener Polygonzug ergibt, der in den Aequometer eingetragen wird. Alle Punkte dieser Polygone liegen definitionsgemäß innerhalb eines Ringes mit dem Radius von 15 m bis 90 m. Jedes Polygon besitzt acht Eckpunkte.

3.5.3. Simulation des Messfehlers

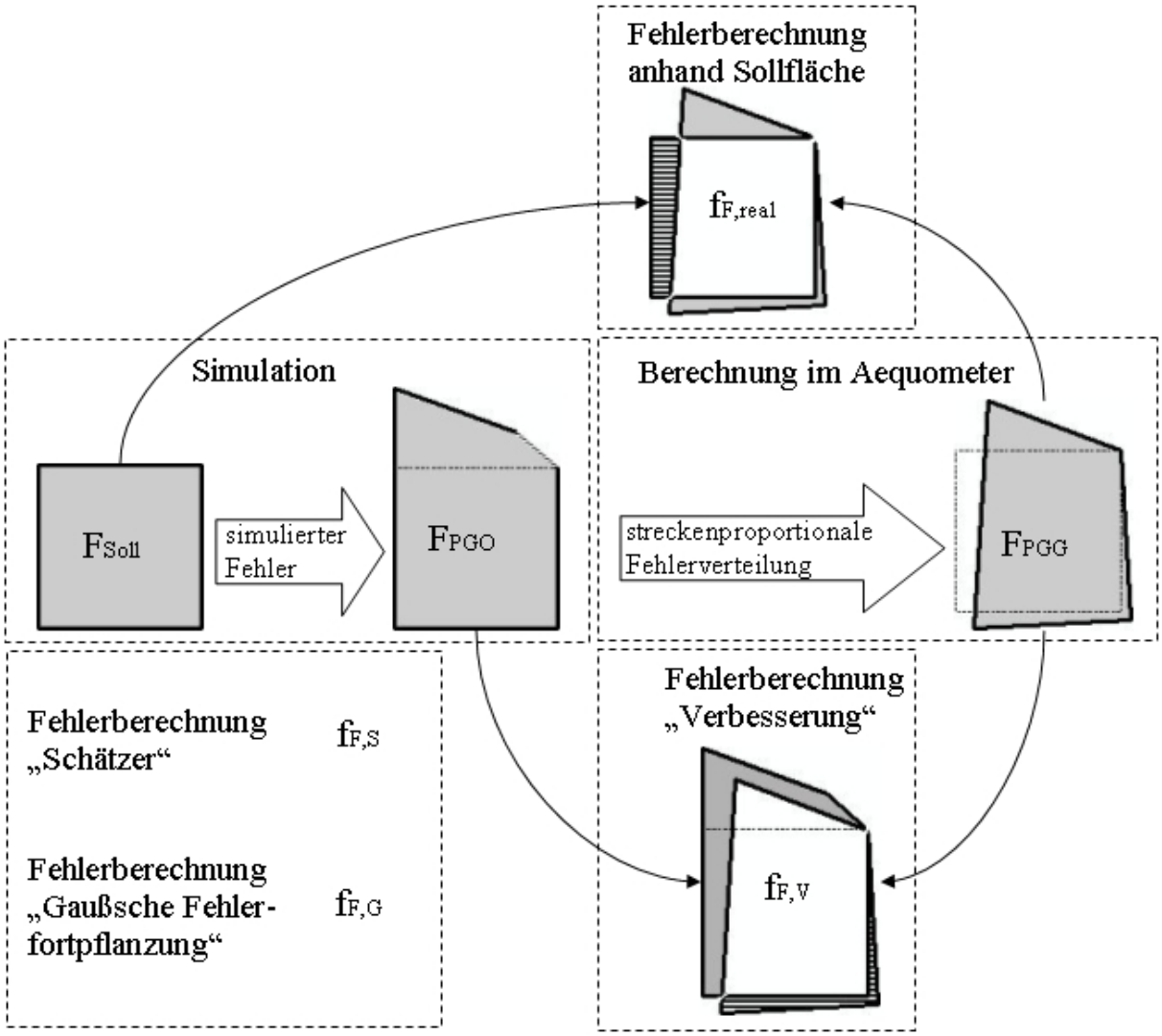


Abbildung 3.5-2 Ablauf der Simulation

In einem weiteren Schritt wurde zu jedem Vektor der zuvor generierten Sollfläche ein zufälliger Messfehler hinzugefügt, um eine reale Messung nachzuempfinden. Auf die Verteilung der Messfehler in der Realität kann anhand der vorliegenden Daten nicht rückgeschlossen werden. Daher wird Normalverteilung unterstellt, um die Geräteungenauigkeiten zu simulieren. Nicht berücksichtigt werden grobe Fehler, wie z. B. falsche Ablesungen und systematische Fehler die beispielsweise durch fehlerhafte Kalibrierung des Messgerätes hervorgerufen werden können. Die Winkelfehler sind absolut in Grad angegeben, die Streckenfehler in Prozent relativ zur Länge des gemessenen Abschnittes. Anhand dieser Werte wurden normalverteilte Zufallszahlen mit dem Mittelwert Null generiert und zu jedem Vektor hinzugefügt.

Für die folgenden Untersuchungen wurden Winkelfehler mit einer Standardabweichung von 0,5° und Streckenfehler mit einer Standardabweichung von 0,5 % generiert. Die Werte wurden so gewählt, um die Mess- und Ablesegenauigkeit der im ersten Teil beschriebenen Mess-

geräte zu simulieren und einen praxisnahe Werte zu erhalten. Für die Untersuchung der Fehlerberechnung und des Zusammenhangs der Messunsicherheiten mit dem Flächenfehler, wird die Größenordnung der Fehler dann variiert.

3.5.4. Vergleich mit realen Messungen

Um festzustellen, ob die Zufallspolygone den in der Praxis aufzunehmenden Flächen in Größe, Form und Größenordnung des Messfehlers ähneln, werden die simulierten Flächen mit den externen Messungen verglichen. Eine vollkommene Übereinstimmung wird nicht angestrebt, da eine Simulation die Realität naturgemäß nicht perfekt abbilden kann. Es soll jedoch sichergestellt werden, dass die in der Simulation gewonnenen Ergebnisse auf die Praxis übertragbar sind. Hierzu werden die statistischen Lageparameter sowie die Häufigkeitsverteilung der simulierten Werte mit den externen Daten verglichen. Im Einzelnen wurden die Flächengrößen und die Umfänge verglichen. Außerdem wurde die Formzahl definiert als das Verhältnis von Fläche zu Umfang gebildet, um einen Wert zu erhalten, der sowohl über die Größenklasse als auch über die Kompaktheit der Geometrien Auskunft gibt. Die Kompaktheit spielt bei der polaren Aufnahme insoweit eine Rolle, als dass bei komplexeren Figuren die Wahrscheinlichkeit höherer Messfehler steigt. Als Maß für die Messfehler wurden außerdem die Abschlussfehler der Messungen miteinander verglichen.

3.5.5. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue

Auch bei den simulierten Flächen wurde die Auswirkung der streckenproportionalen Fehlerverteilung auf die Lagetreue analog zu Abschnitt 3.1.9 durchgeführt. Für die Messungen aus dem Kranzberger Forst war es aufgrund des geringen Stichprobenumfanges nicht möglich, die Auswirkung der streckenproportionalen Fehlerverteilung auf die Flächentreue zu untersuchen. Dies erfolgte anhand der simulierten Flächen. Die Methodik ist identisch zur Untersuchung der Lagetreue.

3.5.6. Korrelationsanalyse der Fehlerwerte

Für die Wertung der berechneten Fehlerwerte wurde zunächst versucht mittels einer Korrelationsanalyse einen direkten Zusammenhang zum realen Flächenfehler nachzuweisen. Es hat sich gezeigt, dass die relevanten Werte bei den gewählten Eingangsparametern nicht korrelieren, daher wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt. Es lässt sich interessanterweise ein Zusammenhang zwischen den Fehlerberechnungsmethoden „Verbesserung“ und „Schätzer“ sowie „Verbesserung“ und „Flächenfehler offenes Polygon“ nachweisen. Da diese Zusammenhänge nicht bedeutsam sind für die Voraussage des realen Flächenfehlers werden sie nicht weiter verfolgt.

3.6. Simulation in Octave

Da zu den folgenden Untersuchungen sehr viele Berechnungen mit unterschiedlichen Faktoren notwendig sind, erschien eine Tabellenkalkulation aus Ressourcengründen nicht als das geeignete Werkzeug. Aus diesem Grund wurden die gesamten in Abschnitt 2.10 beschriebenen Berechnungen in Octave portiert. Octave ist freie Software, die in Leistungsumfang und Bedienung sowie Syntax dem kommerziellen Produkt „Matlab“ sehr ähnlich ist. Die Umsetzung des Rechenweges erfolgte durch Philipp Edelmann, einem Physikstudenten der TU München, der die Funktionen freundlicherweise als Public Domain zur Verfügung stellte. Darauf aufbauend konnten die Ergebnisse der Berechnungen ausgewertet und formatiert ausgegeben werden. Der Rechenweg wurde gewissenhaft geprüft und kommentiert. Exemplarische Ergebnisse wurden mit denen des Aequometers verglichen und Übereinstimmung festgestellt.

3.6.1. Eingangsparameter

Die grundlegenden Eingangsparameter der Simulation in Octave sind die Zufallspolygone und die Standardabweichungen der Messfehler. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die 100 Zufallspolygone der vorhergehenden Untersuchung verwendet. Diese wurden hierzu als tabulatorgetrennte Textdateien in der Form „Richtung Strecke“ gespeichert. Da bei allen Berechnungen auf identische Flächen zurückgegriffen wird, wird die Einfluss der Flächenform als konstant angenommen. Die Standardabweichungen der Messfehler wurden im Programm als Variablen definiert, was eine leichte Anpassung ermöglicht.

Weitere Eingangsparameter sind die Obergrenzen der berechneten Flächenfehler und des realen Flächenfehlers. Diese sind jeweils in Prozent, im Verhältnis von Fläche zu Fehlerverteilung angegeben. Die Berechnungen der Fehlerwerte sind in Abschnitt 2.10.11 f. beschrieben. Der relative „Längenfehler“ $f_{L,prz}$ und die „Verbesserung“ $f_{F,V,prz}$ sind identisch mit den im Aequometer angezeigten Werten. Die Werte „Schätzer“ und „Gaußsche Fehlerfortpflanzung“ werden beide mit dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet, wobei bei Letzterem die Messunsicherheiten vorgegeben wurden, denn in der Simulation sind diese ja bekannt. Im Unterschied dazu sind die Messunsicherheiten des Schätzers aus dem Abschlussfehler berechnet.

3.6.2. Ausgabe der Kenngrößen

Zur Auswertung wurde das Programm mehrmals mit verschiedenen Eingangsparametern gestartet. Bei jedem Durchlauf wurden 100 Flächen je 100-mal mit verschiedenen Messfehlern berechnet. Als Ergebnis erhält man zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der

genannten Fehlerwerte. Weiterhin wird angegeben, in wie viel Prozent der Fälle der „reale Fehler“ unterhalb der definierten Grenze liegt.

Als Auswertung der berechneten Fehlerwerte werden diese jeweils mit der definierten Obergrenze verglichen und dementsprechend ein Wahrheitswert gebildet. Es wird also nur unterschieden ob ein Fehler aufgetreten ist oder nicht. Da Wahrheitswerte als Einsen und Nullen gespeichert werden, entspricht der Mittelwert der Ergebnisse ihrem prozentualen Anteil an Wahr oder Falsch. Stellt man nun die Wahrheitswerte der berechneten Fehler denen der realen Fehler gegenüber, so sind folgende Fälle denkbar:

- Fehler wurde richtig erkannt.
- Fehler wurde nicht erkannt.
- Fehlalarm: es wurde ein Fehler erkannt, obwohl keiner vorliegt.
- Es liegt kein Fehler vor.

Abhängig von der Höhe der simulierten Messfehler, in Verbindung mit den akzeptierten Grenzen, treten Fehler verschieden häufig auf. Würden beispielsweise 95 % der Flächen innerhalb der akzeptierten Grenzen für den realen Fehler liegen, so wäre die Trefferquote des berechneten Wertes, bei entsprechend niedriger Obergrenze, ebenfalls mindestens 95 %, auch wenn kein einziger Fehler erkannt wurde. Um dies zu vermeiden, wurden Flächen bei denen kein Fehler aufgetreten ist in der Auswertung separat ausgewiesen. Die Summe der erstgenannten drei Fälle wurde als 100 % definiert. Ein beispielhaftes Ergebnis von 10 % nicht erkannten Fehlern bedeutet also, dass 10 % der Flächen bei denen ein Fehler aufgetreten ist, nicht erkannt wurden. Dadurch konnte die Vergleichbarkeit der Werte hergestellt werden.

Außerdem wird berechnet, in wie viel Prozent der Fälle die Aussage des Fehlerschätzers korrekt ist. Dieser Fall tritt auf, wenn der reale und der berechnete Fehler beide unter- oder oberhalb ihrer Grenze liegen.

3.6.3. Auswertung der berechneten Fehlerwerte

Um die Aussagekraft der berechneten Fehlerwerte über den realen Flächenfehler auszuwerten, wurde in mehreren Versuchen je ein Eingangsparameter systematisch variiert. Zunächst wurden die Messunsicherheiten konstant gehalten und die akzeptierten Grenzen des realen und der berechneten Fehlerwerte variiert. Bei konstanter Grenze des realen Fehlers wurde für jedes Fehlerberechnungsverfahren der Bereich ermittelt, in dem die Aussagekraft am höchsten ist. Dies ist der Fall, wenn die Anzahl der erkannten Fehler möglichst hoch ist, bei gleichzeitig niedrigen Werten für „nicht erkannt“ und „Fehlalarm“. Die Anzahl der „korrekten Aussagen“ ist weniger aussagekräftig, da diese bei entsprechender Wahl der akzeptierten Grenzen gleich der Anzahl der aufgetretenen Fehler ist.

3.6.4. Einfluss der Messunsicherheiten auf den Flächenfehler

Bislang wurden Winkel- und Streckenfehler immer als ein Gesamtfehler betrachtet, der sich im Abschlussfehler niederschlägt. Praktisch handelt es sich jedoch um zwei unabhängige Fehlerquellen. Daher wird untersucht, welchen Einfluss die Messunsicherheiten der Winkel- und Streckenmessung auf die Flächentreue der Geometrie haben. Fehler der Neigungsmessung werden nicht separat untersucht, da diese sich rechnerisch beim Streckenfehler auswirken. Der Einfluss der Flächenform wird minimiert, da die Simulation den Mittelwert vieler verschiedener Flächen berechnet. Daher wird dieser Faktor als konstant angenommen. Außerdem wird Normalverteilung der Messfehler vorausgesetzt, grobe und systematische Fehler werden also nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind nur in der Größenordnung der simulierten Flächen übertragbar, Einzelflächen können durchaus davon abweichen.

Eingangsgrößen sind die Standardabweichungen der relativen Messunsicherheit der Streckenmessung und der absoluten Messunsicherheit der Winkelmessung in Grad. Als Ausgabegröße wird der relative Flächenfehler berechnet.

4. Ergebnisse

4.1. Flächen im Kranzberger Forst

4.1.1. Berechnung der Fläche und des Umfangs

HOFFMANN (2005) wertete die Daten in seiner Diplomarbeit mit den Demo Tools, einer Extension für ArcGIS aus. Die Ergebnisse für Flächengröße und Umfang sind in den Attributtabellen der Shapedateien gespeichert. Diese Werte wurden mit den vom Aequometer berechneten Werten verglichen.

Die maximale Flächendifferenz beträgt 15 cm², die maximale Differenz des Umfangs 0,05 cm. Diese Unterschiede ergeben sich aus programminternen Rundungsfehlern. Die Differenz ist so gering, dass sie vernachlässigt werden kann. Hiermit wurde bestätigt, dass die Berechnung der Fläche und des Umfangs von Polygonen im Aequometer sich mit der Berechnung durch die Demo-Tools für ArcGIS deckt.

4.1.2. Lagetreue der Punkte

Über alle Eckpunkte hinweg ergab sich bei den Messungen mit dem Handkompass eine mittlere Lageabweichung von einem Meter. Die maximale Lageabweichung liegt bei der Gerätekombination Kompass/Fadenmessgerät bei 2,5 m. Bei der Gerätekombination Kompass/Ultraschalldistanzmessgerät beträgt die maximale Lageabweichung 3,3 m. Bei den Messungen mit dem Polarverfahren unter Verwendung der Forstbussole ergab sich eine maximale Lageabweichung von 1,7 m. Bei der Bewertung der Messgenauigkeit ist zu berücksichtigen, dass die Unsicherheit der Referenzpunkte bereits einen halben Meter beträgt.

In den folgenden Box-Whisker-Diagrammen sind die Ergebnisse der Lagegenauigkeit für die verschiedenen Gerätekombinationen über alle Punkte und nach Flächen getrennt dargestellt. Die Boxplots sind an die übliche Darstellungsform angelehnt. Die „Box“ ist durch die Quartile $Q_{0,25}$ und $Q_{0,75}$ begrenzt und beinhaltet damit 50 % der Messwerte. Der große Querstrich markiert den Median, das Kreuz den arithmetischen Mittelwert. Die Enden der Striche ober- und unterhalb der Box stellen die Minima und Maxima dar. Die Querstriche an den „Whiskers“ markieren die Quartile $Q_{0,05}$ und $Q_{0,95}$.

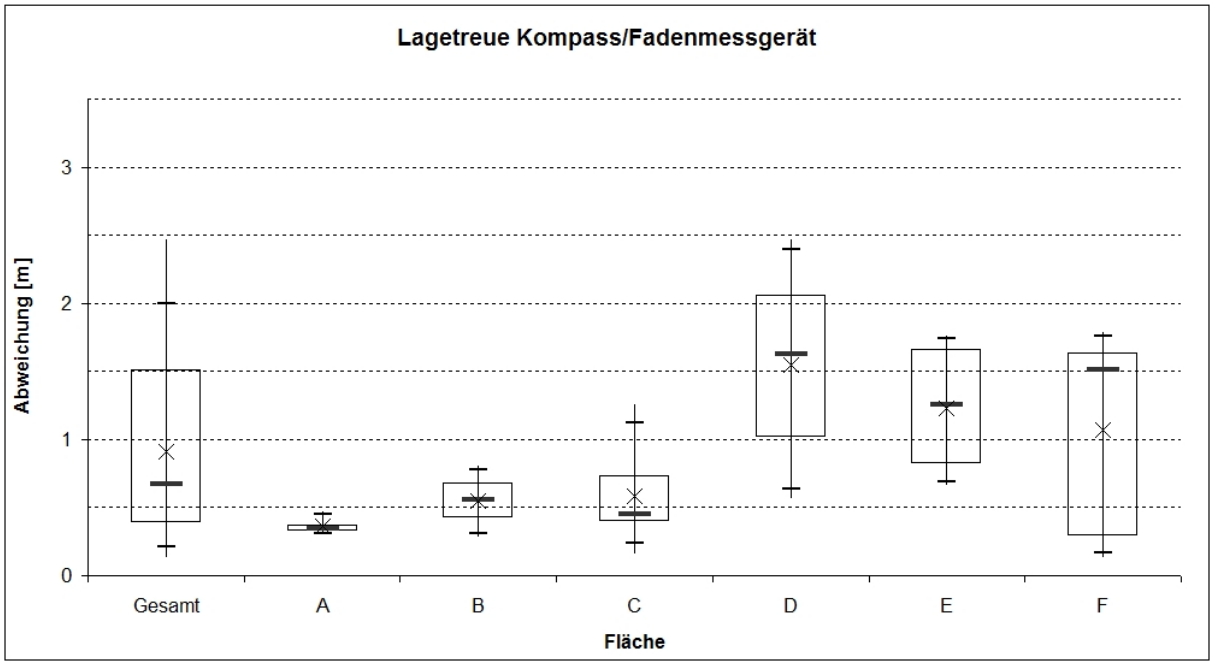


Abbildung 4.1-1 Boxplots Lagetreue Gerätekombination Kompass/Fadenmessgerät

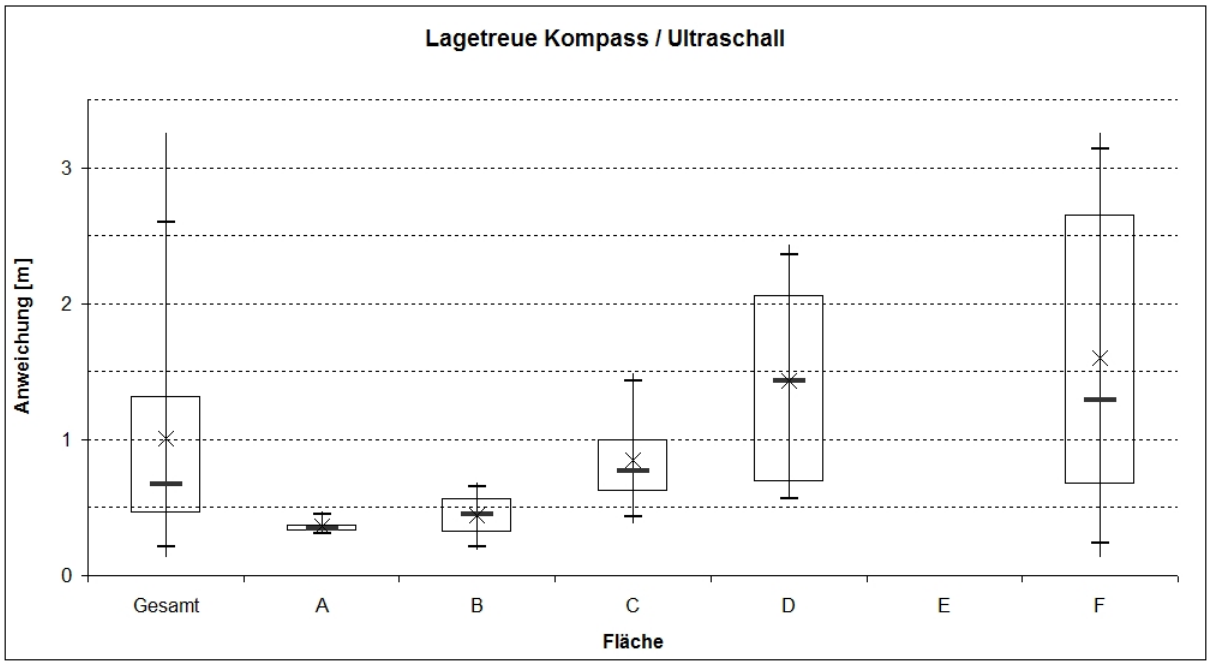


Abbildung 4.1-2 Boxplots Lagetreue Gerätekombination Kompass/Ultraschalldistanzmessgerät

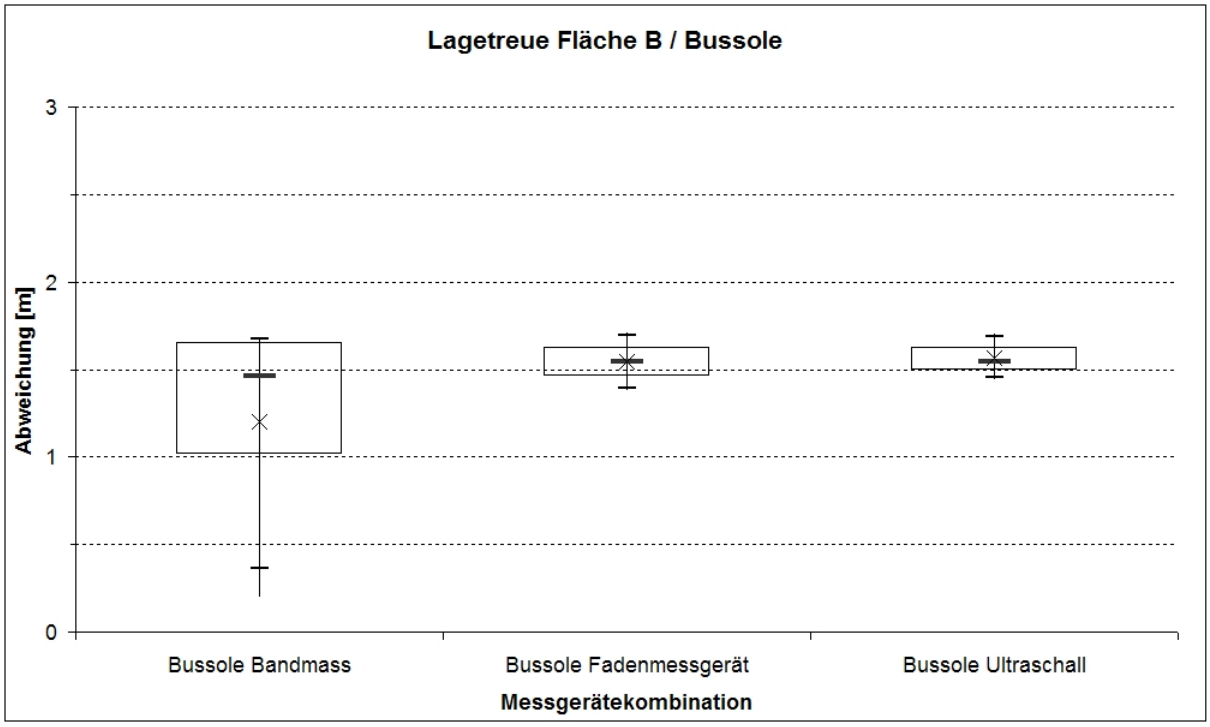


Abbildung 4.1-3 Boxplots Lagetreue der Messungen mit der Bussole auf der Fläche B

4.1.3. Längen- und Flächentreue

Die in den folgenden Diagrammen gezeigten Werte sind die Differenzen aus Umfang bzw. Größe der Flächen ohne Hilfspunkte und den Referenzflächen. Um die Werte vergleichbar zu machen wurden sie mit der Referenzfläche ins Verhältnis gesetzt und prozentual ausgedrückt. Der höchste Fehler ergab sich bei der Fläche E. Sie weist eine Umfangsdifferenz von 2,8 % auf, was 4,34 m entspricht. Die Flächendifferenz beträgt 5,6 % oder 51 m². Die Flächen A, B und C weisen Fehler unter einem Prozent und Fläche F unter zwei Prozent auf. Bei der Fläche D sind bei der Messung mit dem Ultraschalldistanzmessgerät Umfangsfehler von 2,2 % und Flächenfehler in Höhe von 3,4 % aufgetreten. Die Mittelwerte der Fehler wurden aus deren Beträgen errechnet, damit sich positive und negative Fehlerwerte nicht gegenseitig aufheben. Es ergeben sich mittlere Fehler von weniger als einem Prozent (vgl. Abbildung 5.6-2).

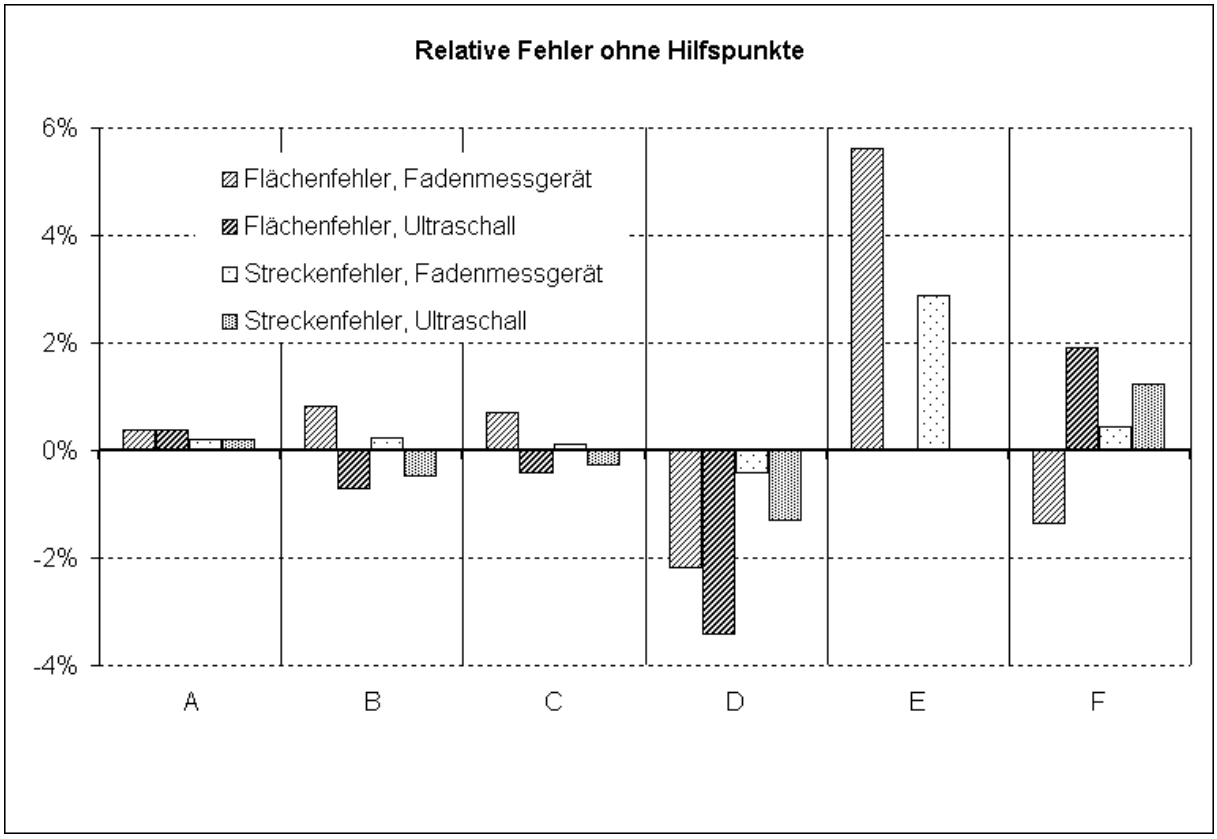


Abbildung 4.1-4 Relative Umfangs- und Flächenfehler der Messungen mit dem Handkompass

Bei den Messungen mit der Bussole an Fläche B ergibt sich ein maximaler Längenfehler von 0,5 % und ein maximaler Flächenfehler von 1,5 %. Abbildung 4.1-5 erlaubt es allerdings nicht, Rückschlüsse auf die Genauigkeit der einzelnen Messgeräte zu ziehen, da jeweils nur eine Messung durchgeführt wurde.

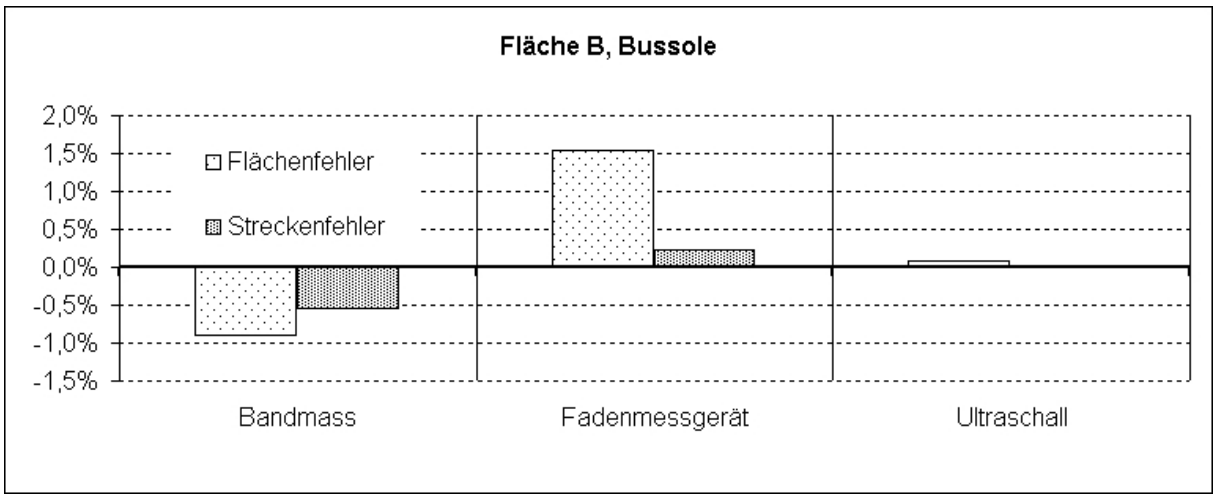


Abbildung 4.1-5 Relative Umfangs- und Flächenfehler der Messungen mit der Bussole

4.1.4. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lagetreue

Es hat sich gezeigt, dass die Summen der Lagefehler des geschlossenen Polygons um den Faktor 2,4 kleiner sind als die Lagefehler der offenen Polygone. Dies stellt eine deutliche Verbesserung dar, die durch die streckenproportionale Fehlerverteilung erzielt wird. Mittels schließender Statistik ließ sich nachweisen, dass die Mittelwerte der Lagefehler nach streckenproportionaler Fehlerverteilung signifikant niedriger sind als vor der Verteilung des Abschlussfehlers.

Abbildung 4.1-6 f. stellen den Lagefehler für die Eckpunkte der Messungen im Kranzberger Forst zehnfach überhöht dar. Die Lagefehler die sich bei der Berechnungsmethode „offenes Polygon“ ergeben sind rot und die Lagefehler der Berechnungsmethode „geschlossenes Polygon mit streckenproportionaler Fehlerverteilung“ schwarz eingezeichnet. Die viereckigen Punkte sind die Startpunkte der Messung, deren Lagefehler sich ausschließlich aus dem Einhängen in das Landeskoordinatensystem ergibt.

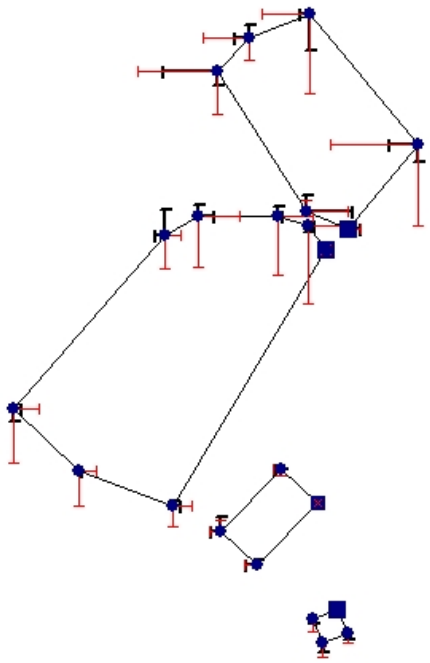


Abbildung 4.1-6 Verbesserung Lagetreue Kompass/Fadenmessgerät

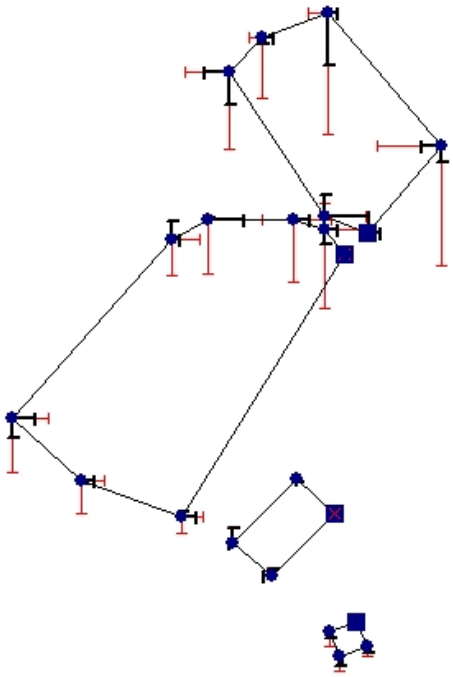


Abbildung 4.1-7 Verbesserung Lagetreue Kompass/Ultraschall

In Abbildung 4.1-8 wird die Wirkung der streckenproportionalen Fehlerverteilung am Beispiel der Fläche C graphisch verdeutlicht. Es lässt sich erkennen, dass bereits der Startpunkt der Messung nicht mit dem Referenzpunkt C_1 zusammen fällt. Dieser Fehler wurde beim Einhängen der Geometrie über eine zusätzliche Messung verursacht und kann nicht ausgeglichen werden. Weiterhin lässt sich gut erkennen, wie sich die einzelnen Messfehler addieren. Dadurch wirkt die gemessene Geometrie im Vergleich zu den Referenzpunkten seitlich ver-

setzt. Besonders deutlich wird das ab dem Punkt C_4. Es kommt hinzu, dass das Ende des Messzuges nicht den Startpunkt trifft. Dadurch entsteht ein Dreieck das nicht zu der eigentlichen Fläche gehört. Solche Splitterpolygone können bei der späteren Weiterverarbeitung mit GIS-Systemen zu Problemen führen. Durch die streckenproportionale Verteilung des Abschlussfehlers liegen die Messwerte näher an den Referenzpunkten. Die Lagetreue der Punkte verbessert sich damit und Splitterpolygone werden vermieden.

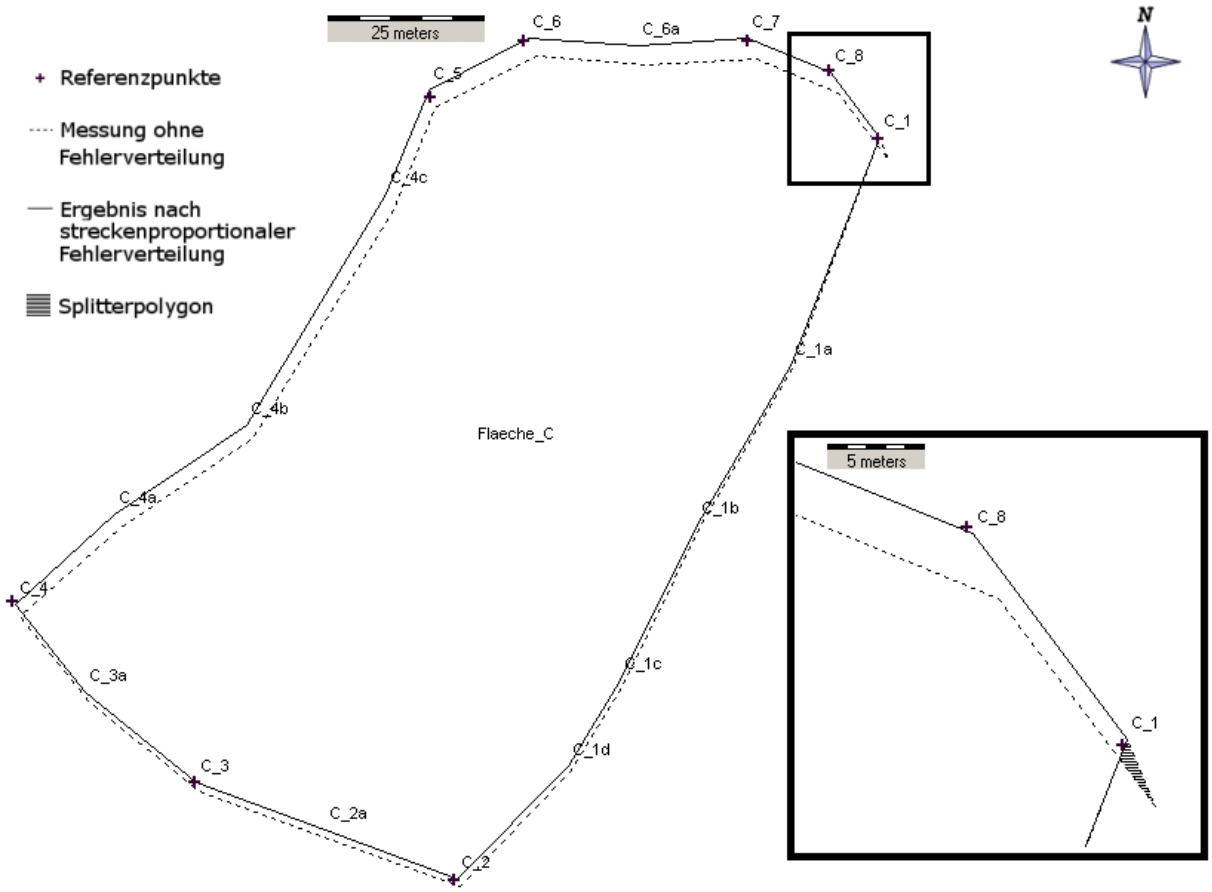


Abbildung 4.1-8 Vergleich der Messung mit und ohne Fehlerverteilung

4.2. Punkte im Kranzberger Forst

Die Aufnahme der Punkte im Kranzberger Forst hatte die Dokumentation der Lage der Einzelbäume zum Zweck der späteren Wiederauffindbarkeit zum Ziel. Das Ergebnis liegt in der vom Aequometer erzeugten Shapedatei vor, welche die Punktgeometrien und die dazu hinterlegten Daten beinhaltet. In der Attributtabelle ist zu jedem Punkt die entsprechende Versuchsnummer gespeichert, was die Zuordnung der Versuchsobjekte zur Geometrie ermöglicht. Durch das Vorliegen der Daten in einem universell lesbaren Format stehen nun alle Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung und Speicherung mit beliebigen GIS-Systemen offen. Der Auftraggeber kann nun z.B. eine Karte mit lagerichtig eingezeichneten und beschrifteten

Punkten erstellen. Weiterhin wäre es möglich, die Koordinaten auf ein GPS-Gerät zu überspielen, das anschließend zum Wiederaufsuchen der Bäume verwendet werden kann.

4.3. Flächen in Hohenschäftlarn

4.3.1. Ergebnis

Die Aufnahmen in Hohenschäftlarn dienten zur Kontrolle, Dokumentation, Visualisierung und Archivierung der Versuchspflanzungen im Rahmen der Diplomarbeit von Olaf RAHM (2005). Die Auswertung der Messergebnisse mit dem Aequometer liefert die Lage der Flächen und deren Größe. Die berechneten Flächengrößen wurden mit den vor Zaunbau und Pflanzung festgelegten verglichen und die Übereinstimmung bestätigt.

Die graphische Darstellung wurde mit der Software ArcGIS erstellt. Hierzu wurden die Shapedateien aus dem Aequometer zusammen mit der digitalen Flurkarte und einem Orthofoto, sowie den digitalisierten Zufahrtswegen dargestellt. Das Ergebnis ist die in Abbildung 3.3-1 dargestellte Karte. Sie zeigt die Bestandessituation der Versuchspflanzungen sowie die Lage zu den benachbarten Beständen. Zur Groborientierung wurde der Diplomarbeit von RAHM (2005) zusätzlich ein Ausschnitt einer Übersichtskarte mit größerem Maßstab beigefügt, auf der die Lage der Flächen zu den nächsten Ortschaften erkennbar ist. So konnte die Lage der Zäune eindeutig und nachvollziehbar dokumentiert werden.

Zur Archivierung der Aufnahmen wurden die Messwerte vom Aequometer als Textformat gespeichert. Zusätzlich wurden die Geometrien in einer Shapedatei gespeichert, wobei jede Fläche einen Datensatz darstellt. Sie enthält Lage und Form der Flächen sowie die dazugehörigen Informationen. Dies ermöglicht später einen einfachen Zugriff auf die Ergebnisse und vereinfacht die Integration in bestehende Geodatenbanken.

4.3.2. Zeitstudie

Die Gesamtzeit im Gelände betrug drei Stunden und 26 Minuten. Davon entfielen 57 Minuten für das Aufsuchen der einzelnen Flächen sowie die notwendigen Vorbereitungen. Die reine Messzeit für alle Flächen und Einhängepunkte betrug zwei Stunden und fünf Minuten. Damit entfällt auf jeden der 33 Punkte eine durchschnittliche Messdauer von knapp vier Minuten. Im Anschluss an die Messungen wurden die erhobenen Daten im Auto in den Laptop eingegeben, um die Schlüssigkeit der Messergebnisse direkt vor Ort zu überprüfen. Dieser Vorgang nahm 21 Minuten in Anspruch.

Teilt man nun die Gesamtzeit im Gelände durch die Anzahl der erhobenen Messpunkte, so ergibt sich für jeden Punkt rechnerisch ein Zeitaufwand von 6 Minuten. Die Gesamtzeit ent-

hält alle durchgeführten Schritte von der Ankunft im Gelände bis zum Vorliegen der digitalen Daten.

Da jede Fläche einmal messend umschritten werden muss, ist die Länge der Seiten für die Dauer der Messung ein wichtiger Faktor. Um diesen zu berücksichtigen, wurde die Durchschnittliche Dauer der Messung pro 100 Laufmeter errechnet. Diese beträgt 12 Minuten ohne Rüstzeit und 22 Minuten, wenn die Rüstzeit mit einbezogen wird. Bei der Interpretation dieses Wertes ist zu beachten, dass der Mittelwert der gemessenen Streckenlängen bei knapp 30 m liegt, dass also durchschnittlich drei Punkte pro 100 m aufgenommen wurden.

4.4. Externe Daten

4.4.1. Lagemaße und Häufigkeitsverteilung

Fünf Förster haben jeweils zwischen 10 und 61, zusammen 162 verwertbare Messungen zur Verfügung gestellt. Dies entspricht im Mittel 32 Flächen pro Person.

Es wurde die **Anzahl der Eckpunkte** der vermessenen Flächen betrachtet. Das Minimum liegt bei drei, das Maximum bei 41 Punkten. Das arithmetische Mittel beträgt acht Eckpunkte. Die Hälfte aller Flächen besitzt zwischen fünf und neun Eckpunkten.

Die **Flächengrößen** schwanken zwischen 150 m² und 2,8 ha, bei einem arithmetischen Mittel von 0,5 ha. Der Median liegt mit 0,2 ha deutlich darunter, 75 % der Flächen sind kleiner als 0,6 ha. Es blieben allerdings sechs Flächen unberücksichtigt, deren Größe bei vier Hektar liegt.

Um die **Verteilung der Messwerte** zu untersuchen, wurde ein klassifiziertes Häufigkeitsdiagramm erstellt. Die Klassenbreite wurde auf 0,25 ha festgelegt. Im Bereich zwischen null und zwei Hektar kann die Verteilung durch die Exponentialfunktion „ $y = 112{,}83e^{-2{,}3252x}$“mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,98 beschrieben werden. Größere Flächen treten zufällig und in geringer Anzahl auf.

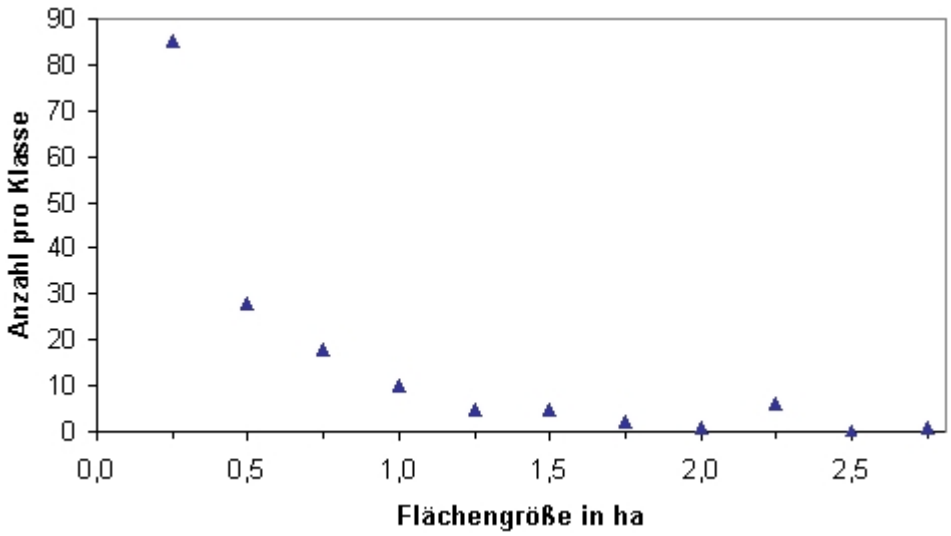


Abbildung 4.4-1 Klassifiziertes Häufigkeitsdiagramm der Flächengrößen

Die Umfänge bewegen sich zwischen 60 m und 1,2 km, das arithmetische Mittel beträgt 0,3 km. 95 % der Flächen haben einen geringeren Umfang als 0,6 km. Die klassifizierte Häufigkeitsverteilung der Umfänge zeigt ähnliche Charakteristika wie die der Flächengrößen.

Da die Höhe des absoluten Fehlerwertes mit der Größe der gemessenen Fläche zusammenhängt, wurden bei der Untersuchung des **Längenfehlers** die relativen Fehler betrachtet. Diese drücken die Höhe des Abschlussfehlers im Bezug auf den Umfang des gemessenen Polygons aus. Die Bandbreite der Fehler reicht von nahe null bis vier Prozent und liegt im Mittel bei 0,8 %. Nur 5 % der Flächen weisen einen relativen Längenfehler über 2,5 % auf.

Das klassifizierte Häufigkeitsdiagramm mit einer Klassenbreite von 0,25 % zeigt die Verteilung der Fehlerwerte. Im Bereich zwischen null und einem Prozent ist die Verteilung linksgipflig, mit dem Maximum in der Klasse 0,25 % bis 0,5 %. Größere Fehler als ein Prozent treten zufällig und in geringer Anzahl auf. Über drei Viertel aller Werte liegen unter einem Prozent, Fehler über zwei Prozent treten in zehn von Hundert Fällen auf.

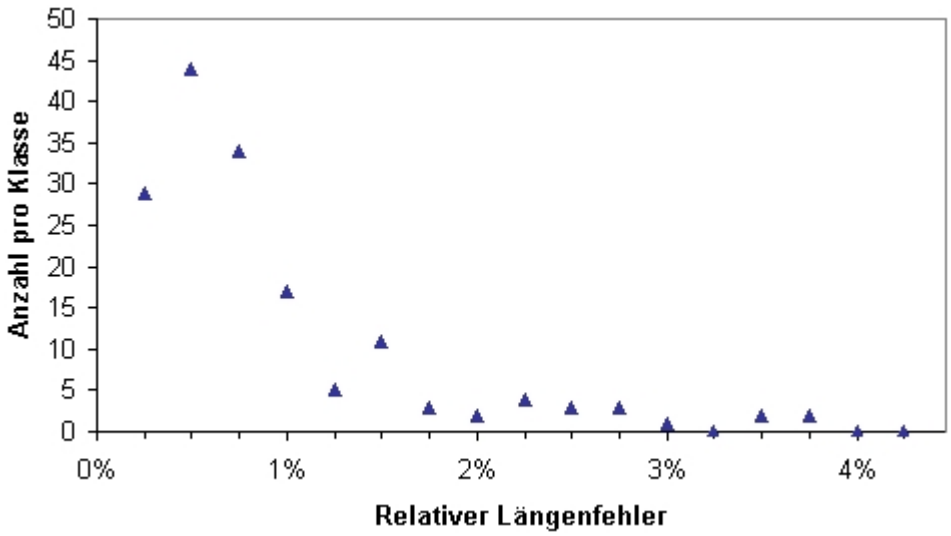


Abbildung 4.4-2 Klassifiziertes Häufigkeitsdiagramm der relative Längenfehler

4.4.2. Vergleich der Flächengrößen „Fläche 1.0“ und Aequometer

Der Vergleich der Flächengrößen nach Berechnung der Programme „Fläche 1.0“ und Aequometer zeigt, dass gewisse Abweichungen bestehen (vgl. hierzu Abschnitt 3.4.3). Es konnte zwar mittels der Korrelationsanalyse nachgewiesen werden, dass ein sehr starker Zusammenhang zwischen den Werten besteht, was jedoch zu erwarten war, da es sich jeweils um identische Messungen handelt. Der Mittelwert der relativen Flächenabweichungen liegt jedoch bei etwa 2 % der Flächengröße. Außerdem fällt auf, dass die Abweichungen der Ergebnisse des Programms „Fläche 1.0“ zu den Berechnungsmethoden „geschlossenes Polygon mit streckenproportionaler Fehlerverteilung“ bzw. „offenes Polygon“ Unterschiede zeigen. Zur genaueren Betrachtung werden die Ergebnisse anhand folgender Flächen beispielhaft dargestellt:

Bei der Fläche 2_38 beträgt die Länge des Schlussvektors 27 cm, was bei einem Umfang von 208 m einen relativen Längenfehler von 0,1 % bedeutet. Die relativen Flächendifferenzen zum Ergebnis von „Fläche 1.0“ betragen beim geschlossenen Polygon 0,3 %, beim offenen Polygon 0,2 %.

Fläche 2_22 hingegen hat einen Längenfehler von 3 m oder 3,4 % des Umfangs von 124 m. Die relativen Flächendifferenzen betragen beim geschlossenen Polygon 11,2 %., beim offenen Polygon 0,4 %.

Abschließend wird Fläche 2_43 betrachtet, die mit 8,2 m Schlussvektor bei 380 m Umfang einen relativen Längenfehler von 2,2 % aufweist. Beim geschlossenen Polygon ergibt sich eine relative Flächendifferenz von 6 %, beim offenen Polygon von 12 %.

Diese drei Beispiele verdeutlichen, wann sich Abweichungen ergeben. Fläche 2_38 weist einen niedrigen Längenfehler auf und Abweichungen sind ebenfalls niedrig. Flächen 2_22 und

2_43 haben jeweils Längenfehler von mehr als 2 %, die sich deutlich auf die Flächenabweichung auswirken. Es ist auffallend, dass bei den Flächen 2_22 und 2_43 einmal die relative Abweichung des geschlossenes Polygons und einmal die des offenes Polygons jeweils zu „Fläche1.0“ über 10% betragen und jeweils die andere Abweichung deutlich geringer ausfällt. Es wird davon ausgegangen, dass beide Programme rechnerisch fehlerfrei arbeiten. Die Abweichungen werden folglich durch die unterschiedliche Behandlung des Abschlussfehlers hervorgerufen. Diese wirkt sich bei geringem Abschlussfehler nicht stark aus.

4.5. Simulierte Flächen

4.5.1. Vergleich der simulierten und externen Flächen

Um zu überprüfen, inwieweit die Simulation sich mit Werten aus der Realität deckt, wurden die statistischen Lageparameter und Häufigkeitsverteilungen der simulierten Flächen mit denen der externen Daten verglichen. Da es sich um verhältnisskalierte Daten handelt, wurden Klassen gebildet, um die Häufigkeiten pro Klasse darstellen zu können. Die Klassenbreite ist in jedem Diagramm einheitlich festgelegt, die Klassen sind auf der Rechtsachse angetragen. Auf der Hochachse ist die dazugehörige Häufigkeit dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl von Stichproben wurde die Häufigkeit jeweils auf 100 Messwerte bezogen dargestellt, um bei identischen prozentualen Häufigkeiten eine identische Amplitude zu erhalten. Um den Kurvenverlauf optisch hervorzuheben, wurde jeweils der gleitende Durchschnitt aus zwei Perioden als Graph dargestellt. Dieser ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert von je zwei aufeinander folgenden Datenpunkten.

Der Vergleich der Lageparameter von Flächengröße und Umfang zeigt bereits deutlich, dass die simulierten Flächen im Durchschnitt etwas größer sind als die von Förstern gemessenen externen Flächen. Die Häufigkeitsverteilung der Flächengrößen der externen Flächen wurde bereits in Abschnitt 4.4.1 betrachtet. Sie lässt sich im Bereich zwischen null und zwei Hektar mit einer Exponentialfunktion beschreiben, Werte darüber treten zufällig und in geringer Anzahl auf. Die Verteilung der Flächengrößen der simulierten Flächen ist dagegen glockenförmig. Auch beim Umfang zeigt sich ein ähnliches Bild, hier stellt sich die Verteilung der externen Messungen jedoch als linksgipflige Verteilung dar, die Glockenkurve der simulierten Flächen hat den Scheitelpunkt weiter rechts. Ebenso verhält es sich bei der Verteilung der Formzahl. Die Verteilung der Abschlussfehler ist sowohl bei den simulierten als auch bei den externen Flächen linksgipflig, wobei der Scheitelpunkt der simulierten Flächen wiederum weiter rechts liegt.

Dieses Ergebnis zeigt die Wahl der Eingangsparameter der Simulation. Kleinere Flächen werden weniger stark berücksichtigt, sehr große Flächen gar nicht. Die Mittelwerte der Simulation liegen etwas höher als die der externen Daten, die stark von den vielen kleinen Flächen unter 0,5 ha beeinflusst sind. Ebenso ist der Interquartilsabstand I_{50} bei den simulierten Flä-

chen enger als bei den externen Daten. Die Verteilung der Flächengrößen und Umfänge ist durch die Art und Weise der Simulation bestimmt. Entscheidend ist, dass die Größenordnung repräsentativ für die Praxis ist. Außerdem sollte die Kompaktheit der simulieren Flächen in etwa den Gegebenheiten in der Natur entsprechen. Der Vergleich der Formzahlen zeigt dies anschaulich. Die Scheitelpunkte der Kurven liegen nicht auf einer Ebene, was durch die etwas größeren simulierten Flächen bedingt ist. Die Streuung der in der Praxis vermessenen Flächen ist weiter. Dennoch ist die Größenordnung der externen Daten dieselbe wie die der simulierten Flächen. Die Abschlussfehler entsprechen sich in der Form der Kurve, wobei der Scheitelpunkt der simulierten Daten etwas höher liegt. Auch hier ist die Größenordnung identisch.

Hiermit wurde gezeigt, dass die simulierten Flächen den in der Praxis aufgenommen ähneln. Die Übereinstimmung wird als ausreichend gewertet, um die Ergebnisse der Simulation auf die Praxis übertragen zu können.

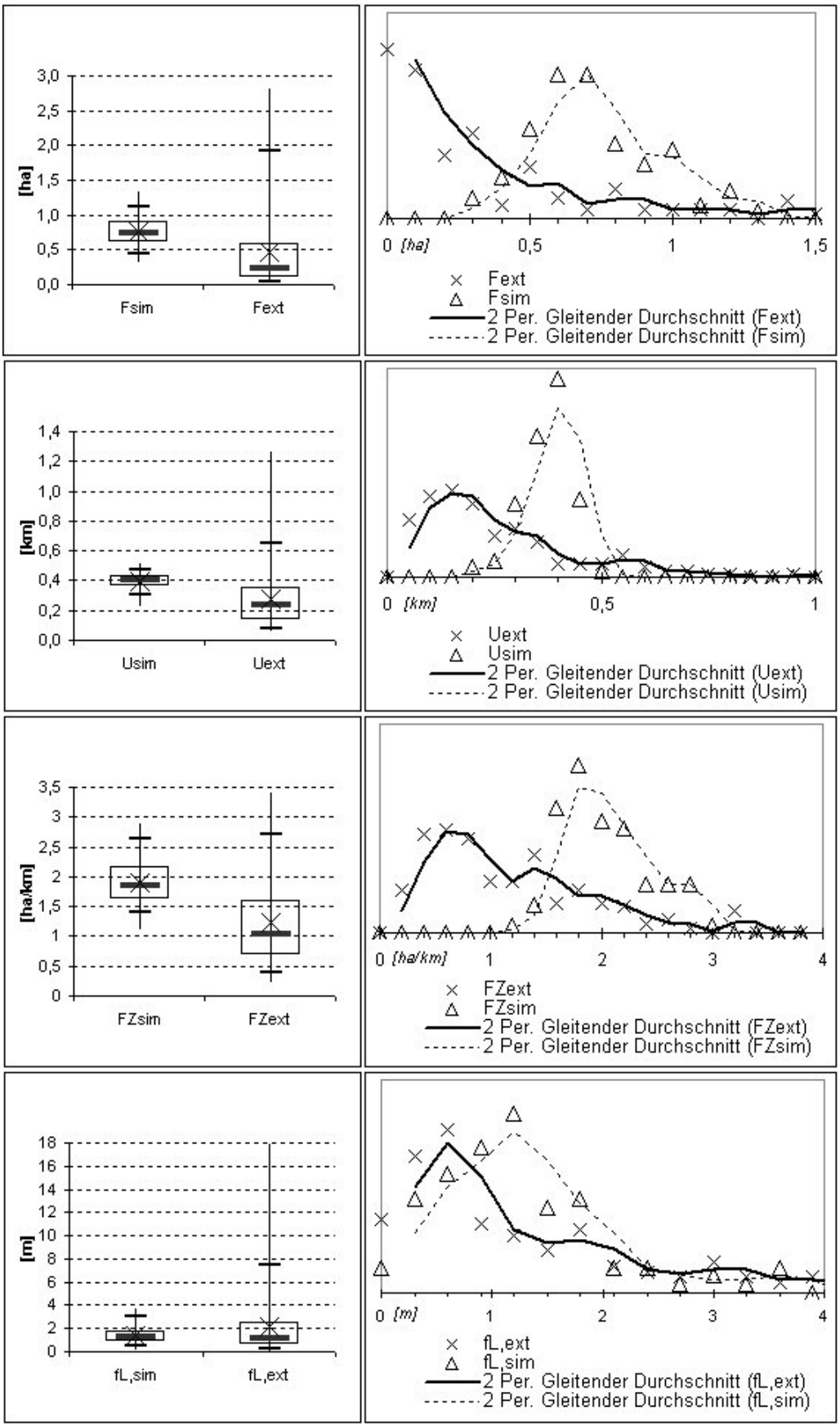


Abbildung 4.5-1 Lageparameter und Häufigkeitsverteilung der Simulation im Vergleich mit real gemessenen Daten

4.5.2. Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue

Wie bereits bei den Messungen im Kranzberger Forst, wurde auch bei den simulierten Flächen die Auswirkung der streckenproportionalen Verteilung des Abschlussfehlers auf die Lagetreue untersucht. Zusätzlich konnte hier die Auswirkung auf die Flächentreue untersucht werden, was anhand der Messungen im Kranzberger Forst wegen der zu niedrigen Anzahl von Stichproben nicht möglich war. Der Vergleich der Summen vor und nach Fehlerverteilung zeigt eine Verbesserung der Lagetreue um den Faktor 2,0 und eine Verbesserung der Flächentreue um den Faktor 1,6. Der t-Test weist ebenfalls nach, dass die Mittelwerte von Lage- und Flächenfehler nach Fehlerverteilung geringer sind. Die Aussage gilt allerdings nur bei Betrachtung der Gesamtheit der Stichprobe, nicht für einen beliebigen Einzelwert. Es ist durchaus möglich, dass sich einzelne Werte durch die Fehlerverteilung auch verschlechtern.

Abbildung 4.5-2 zeigt die statistischen Lageparameter der Lage- und Flächenfehler vor und nach Verteilung des Abschlussfehlers. Es lässt sich deutlich erkennen, dass eine Verbesserung eintritt.

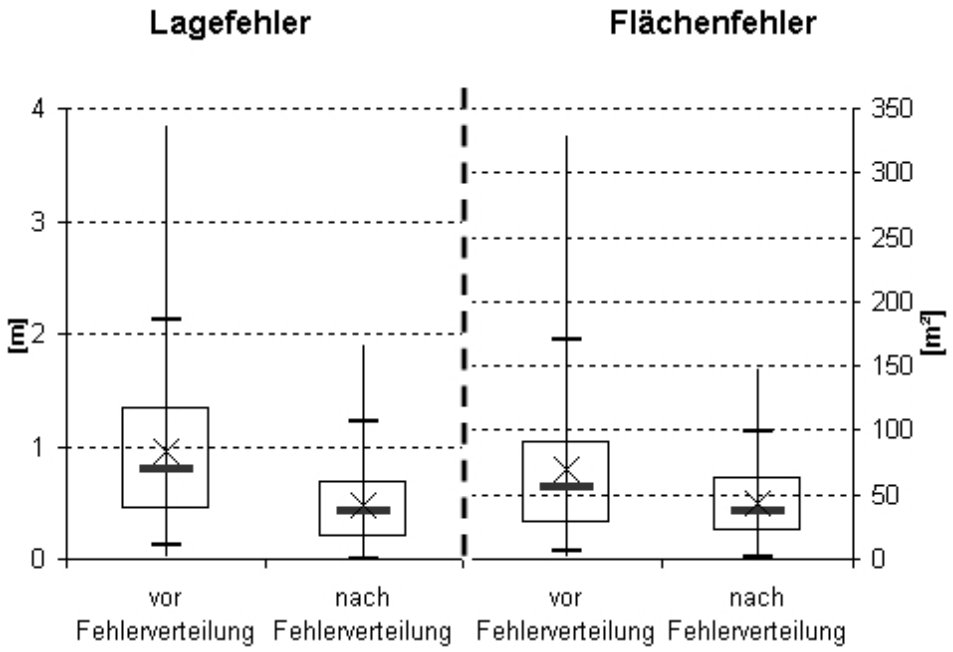


Abbildung 4.5-2 Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue

4.5.3. Auswirkung der Messunsicherheiten auf den Flächenfehler

Die Messunsicherheiten wurden systematisch variiert, um zu ermitteln welchen Einfluss Winkel- und Streckenfehler auf den Flächenfehler haben. Für jede Kombination wurden alle Flächen 100-mal mit zufälligen normalverteilten Messfehlern berechnet und der Mittelwert gebildet. Das Ergebnis wird in einem Diagramm mit Linien gleichen Fehlers dargestellt. Auf der Hochachse sind die Standardabweichungen der absoluten Winkelfehler in Grad, auf der Rechtsachse die der relativen Streckenfehler aufgetragen. Die Niveaulinien repräsentieren die relativen Flächenfehler. Aus dem Diagramm kann nun abgelesen werden, bei welchen Messunsicherheiten relative Flächenfehler in welcher Höhe erwartet werden können. Die Übergänge sind jedoch, vor allem im Bereich höherer Fehler, nicht eindeutig definiert, sondern weisen gewisse Schwankungen auf. Diese sind mit den Bedingungen der Simulation erklärbar. In der Praxis können sich, bedingt durch die jeweilige Flächenform, Abweichungen von der dargestellten Grafik ergeben. Es zeigt sich, dass Flächenfehler über 5 % erst bei Messunsicherheiten auftreten, die weit über der Messgenauigkeit der verwendeten Geräte liegen. Daraus wird gefolgert, dass bei gewissenhafter Aufnahme Flächenfehler unter 5 % problemlos erreichbar sind.

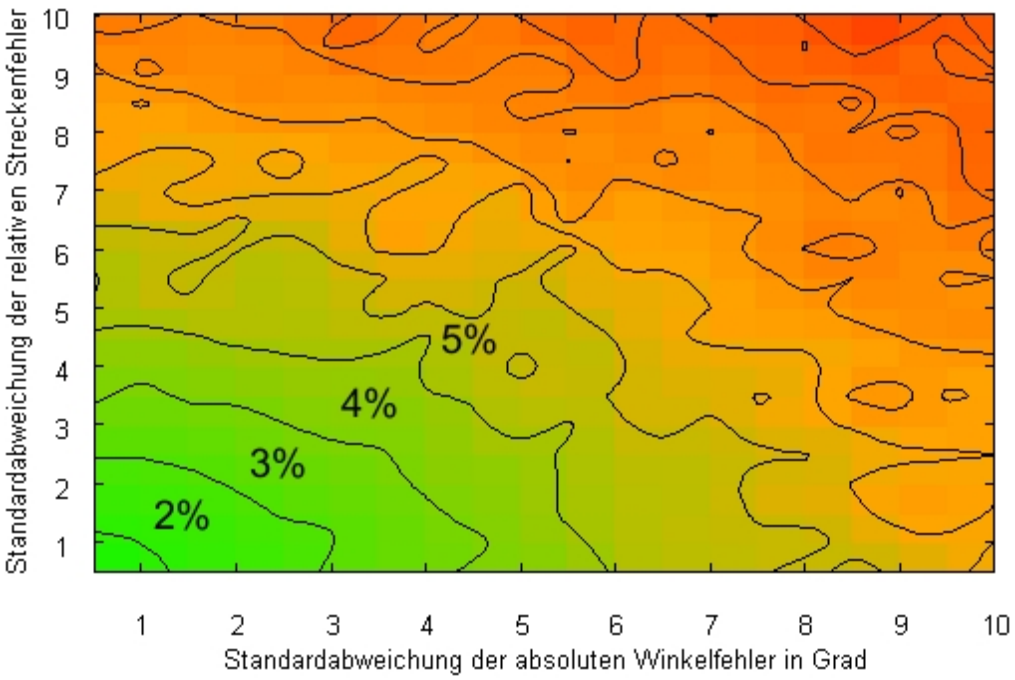


Abbildung 4.5-3 Auswirkungen der Messunsicherheiten auf den relativen Flächenfehler

4.5.4. Auswertung der Fehlerschätzer

Die in Octave berechneten Ausgaben haben eine differenzierte Betrachtung des Verhaltens der berechneten Fehlerwerte bei unterschiedlich gesetzten Schranken und Messfehlern ermöglicht. Es fällt zunächst auf, dass die Messfehler sehr hoch sein müssen, um Flächenfehler in einer realistischen Größenordnung zu erzeugen. Durch systematisches Variieren je eines Eingangsparameters, wurden „kritische Bereiche“ ermittelt, in denen etwa die Hälfte der Flächen reale Fehler in einer nicht akzeptablen Größenordnung aufweisen. Dort wurde für jedes Verfahren der Fehlerberechnung der „beste Wert“ gesucht, für den die meisten Fehler erkannt wurden. Es hat sich gezeigt, dass von keinem Berechnungsverfahren deutlich mehr als 50 % der Fehler erkannt wurden. Der andere Teil lässt sich durch Variieren der akzeptierten Grenze für den berechneten Fehler auf „nicht erkannt“ und „Fehlalarm“ verteilen. Hieraus muss gefolgert werden, dass mit keinem der behandelten Verfahren normalverteilte Messfehler sicher erkannt werden können.

Daraufhin wurden bei mehreren, zufällig ausgewählten Flächen Messfehler von Hand eingefügt, um grobe Fehler zu simulieren. Es wurde pro Fläche nur bei einem Vektor ein Messfehler eingefügt. Hier wurden alle Fehler erkannt.

5. Diskussion

5.1. Messgeräte und -verfahren

5.1.1. Gegenüberstellung der Messgeräte

Zur **Winkelmessung** ist der verwendete Kompass „System Wilkie“ bestens geeignet. Prinzipiell ist jeder hochwertige Kompass ist für diesen Zweck geeignet, vorausgesetzt er verfügt über eine Peileinrichtung und eine gedämpfte Skala. Hochwertige Kompasse zeichnen sich unter anderem durch ein präzise gefertigtes Lager aus sehr hochwertigem Material aus. Dies ist die Voraussetzung für ein freies Einspielen der Nadel oder Skala. Aus diesem Grund sind „Hobby-Kompasse“ für vermessungstechnische Zwecke nicht geeignet.

Bussolen erlauben genauere Messungen als der Handkompass. Die für die Messung benötigte Zeit ist jedoch höher, da das Gerät auf einem Stativ aufgestellt, horizontiert und zentriert werden muss. Sind nur wenige Instrumentenstandpunkte erforderlich, so kann die höhere Genauigkeit die zusätzlich benötigte Zeit relativieren. Präzisionsmessungen werden jedoch meistens mit elektrooptischen Messgeräten ausgeführt. Daher sind Bussolen sowie andere Messgeräte, die ein Stativ erfordern, für eine rationelle Durchführung von vermessungstechnischen Aufgaben im Forst nur bedingt geeignet.

Ist für die **Streckenmessung** eine Genauigkeit im Dezimeterbereich ausreichend so ist das Fadenmessgerät das vergleichsweise günstigste Gerät. Jede zu messende Strecke muss nur ein Mal abgeschritten werden und die Messung kann alleine durchgeführt werden. Messungen mit dem Bandmaß sind genauer, erfordern aber zwei Personen. Die Messung nimmt im Vergleich zum Fadenmessgerät mehr Zeit in Anspruch.

Das Ultraschalldistanzmessgerät ist dort von Vorteil, wo viele Messungen mit kurzen Distanzen durchzuführen sind. Zum Aufstellen des Transponders ist eine zweite Person hilfreich. Es hat sich gezeigt, dass Messungen bei sehr dichtem Bewuchs mit dem verwendeten Gerät nicht zuverlässig durchführbar waren. Bei den Aufnahmen zu dieser Diplomarbeit lagen manche Messergebnisse sehr weit vom Sollwert entfernt. Es ist nicht genau bekannt, warum diese Fehler auftraten. Vermutlich war die Messung durch Störgeräusche von Vögeln oder Flugzeugen beeinflusst. Diese groben Fehler wurden durch eine Plausibilitätsabschätzung erkannt und die Messungen sofort wiederholt.

Auf eine Auswertung der Messungen mit Laserdistanzmessgeräten wurde wegen der aufgetretenen Probleme verzichtet. Wegen Regen bzw.r hoher Luftfeuchtigkeit war keine präzise Messung mit dem verwendeten Gerät möglich. Es ist bekannt, dass Reflexionen an Wassertröpfchen in der Luft das Messergebnis verfälschen können. Zusätzlich erschwerte die Vege-

tation die Messung. Es stellte außerdem sich als schwierig heraus, die Zieltafel über weite Entfernungen aus der Hand anzupeilen und den Laserpunkt zum Zeitpunkt der Messung genau auf der Zieltafel zu halten. Die probehalber durchgeführten Messungen waren zwar großteils sehr genau, ein Anteil von ca. 10 % lag jedoch sehr weit vom Sollwert entfernt. Diese Fehler sind vermutlich darin begründet, dass nicht die Zieltafel getroffen wurde, sondern vielmehr ein Punkt davor oder dahinter.

Der Einsatz hochwertiger elektronischer Distanzmessgeräte kann in der forstlichen Vermessung sinnvoll sein, wenn dadurch mehrfache Laufwege erspart werden. Insbesondere beim Polarverfahren bietet sich der Einsatz solcher Geräte an. Da alle Messungen von einem Standpunkt aus durchgeführt werden, ist mit zwei Personen ein rasches Aufnehmen vieler Messwerte möglich. Welches Gerät tatsächlich Anwendung finden sollte, hängt somit vor allem vom Messverfahren und der geforderten Genauigkeit ab. Für die Messung eines Polygonzuges können prinzipiell alle genannten Messgeräte verwendet werden, nicht zuletzt spielt also die Vorliebe des Messenden eine Rolle.

5.1.2. Kritische Betrachtung der verwendeten Messverfahren

Bei den Aufnahmen von **Flächen im Kranzberger Forst** kamen die Messverfahren geschlossenes Polygon und offenes Polygon zum Einsatz. Die Messung zum Einhängen der Fläche wurde als freier Linienzug angelegt. Durch diesen entstand beim Einhängepunkt der Fläche E bereits ein Lagefehler von 65 cm. Die Lagefehler aller anderen Einhängepunkte waren geringer. Die Lagefehler hätten wahrscheinlich verbessert werden können, wenn die Messung nicht als Linienzug, sondern als geschlossenes Polygon aufgenommen worden wäre. Da dies aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht ohne Freischneidearbeiten möglich war, wurde ein höherer Fehler wissentlich in Kauf genommen. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass die Unsicherheit der Referenzwerte bereits einen halben Meter beträgt, was den oben genannten Lagefehler in einem besseren Licht erscheinen lässt.

Fläche E hat die Form eines länglichen Rechtecks. Dadurch wirken sich Winkelfehler an den langen Seiten bzw. Streckenfehler an den kurzen Seiten stark auf die Flächengröße aus. Die Flächenform ist also fehlertheoretisch ungünstig. Diese Fläche wurde als offenes Polygon ausgewertet, da eine der langen Seiten nicht einsehbar war. Es ergibt sich eine Flächenabweichung von 5,6 % was absolut ausgedrückt 50 m² entspricht. Wäre die Fläche als geschlossenes Polygon erhoben worden, hätte dies aber zu einem ähnlichen Ergebnis führen können, da die Fehlerverteilung die Flächenform gerade bei länglichen Figuren nicht in jedem Fall verbessert. Der Fehler wäre dann aber durch die berechneten Fehlerwerte zu erkennen gewesen, so dass die Aufnahme ggf. mit höherer Präzision wiederholt hätte werden müssen.

Fläche B wurde zusätzlich zu den Messungen mit dem Handkompass auch mit der Bussole, nach dem Verfahren der zentralen Aufstellung vermessen. Hierbei wurde jedoch auf eine

Kontrolle der Messgenauigkeit verzichtet, da keine Spannmaße erhoben wurden. Die Auswertung zeigt, dass sich durchgehend Flächenfehler unter 1,5 % ergeben, was als gutes Ergebnis betrachtet werden kann. In der Praxis sind Aufnahmen mit diesem Messverfahren jedoch unbedingt durch Spannmaße zu sichern, um grobe Fehler erkennen zu können.

Die Aufnahmen im Kranzberger Forst dienten unter anderem dem Vergleich der verschiedenen Messverfahren. Es hat sich gezeigt dass Flächen die nach dem Verfahren des offenen Polygons aufgenommen werden, nicht zwingend schlechtere Ergebnisse liefern müssen wie nach dem Verfahren des geschlossenen Polygons. Beispielsweise weist Fläche D, aufgenommen nach dem Verfahren des geschlossenen Polygons, einen höheren Flächenfehler auf als Fläche F, die nach dem Verfahren des offenen Polygons erhoben wurde. Allerdings ist es nicht möglich, Messungen nach dem Verfahren des offenen Polygons rechnerisch zu kontrollieren, was bedeutet dass deren Messfehler unerkannt bleiben.

Das Polarverfahren erlaubt bei Verwendung einer Forstbussole anstatt eines Handkompasses genauere Winkelmessungen. Um genaue Ergebnisse zu bekommen ist auch die präzise Streckenmessung wichtig. Bei den Messungen im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde im Ein-Mann-Verfahren gearbeitet, bei der Messung mit dem Bandmass wurde dieses mit einem Häring im Boden fixiert. Da hierbei die notwendige Spannung des Bandmaßes nicht erreicht wurde, ergaben sich dabei höhere Fehler als das im Zwei-Mann-Verfahren vermutlich der Fall gewesen wäre. Messungen mit der Bussole können naturgemäß nur dann präzise Ergebnisse liefern, wenn das verwendete Streckenmessgerät auch entsprechend genau ist.

Die **Flächen in Hohenschäftlarn** wurden alle als geschlossener Polygonzug erhoben. Die drei Freiflächen wurden in einem Messzug erhoben, da diese direkt aneinander angrenzen. Dies ersparte Zeit und Laufwege und machte zudem ein Begehen der Fläche überflüssig. Allerdings wurde dadurch die Auswertung etwas komplizierter, da die Größen der Teilflächen einzeln berechnet werden mussten. Die Zeit, die bei der Aufnahme gespart wurde, kompensierte jedoch den Mehraufwand bei der Auswertung.

Eine Besonderheit stellt auch das Einhängen der Flächen unter Schirm in das Landeskoordinatennetz dar. Da das umschließende Polygon ebenfalls erhoben wurde, wäre es möglich gewesen, aus den berechneten Eckpunkten dieses Polygons die Einhängepunkte der Einzelflächen zu erhalten. Da die Sichtverhältnisse jedoch ein Einhängen über je eine Messung erlaubten, wurden die drei Flächen direkt eingehängt. Hierdurch wurde die Lagetreue der Einhängepunkte erhöht. Für die zwei zusätzlichen Messungen wurden insgesamt acht Minuten benötigt, der Mehraufwand hielt sich also in Grenzen.

Die Aufnahme „Punkte im Kranzberger Forst“ ist ein gutes Beispiel für die **Kombination verschiedener Messverfahren**. Die Art wie die Messungen angelegt wurden ermöglichte ein rationelles Arbeiten und führt zu fehlertheoretisch günstigen Ergebnissen. Da die Eckpunkte

des geschlossenen Polygons durch die Berechnung des Abschlussfehlers und dessen streckenproportionale Fehlerverteilung eine gesicherte Genauigkeit haben, eignen sie sich als Instrumentenstandpunkte für weitere Aufnahmen. Diese erfolgten als zentrale Aufstellung. Auf eine Absicherung dieser Messwerte mit Spannmaßen wurde aufgrund wirtschaftlicher Abwägung verzichtet. Damit werden gegebenenfalls höhere Lageabweichungen bei einzelnen Punkten in Kauf genommen, bei denen ein höherer Messfehler aufgetreten sein könnte. Dies wirkt sich aber nicht auf weitere Punkte aus, da bei der zentralen Aufstellung keine Verkettung der Messvektoren gegeben ist. Da die Messungen gewissenhaft durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass die Lagegenauigkeit der Punkte nicht wesentlich schlechter ist als es die Ablesegenauigkeit der Messgeräte erlaubt. Die Messung steht beispielhaft für eine Vielzahl an vermessungstechnischen Aufgaben, die durch eine gute Planung und ein geschicktes Anlegen der Messzüge unter Kombination der genannten Messverfahren einfach durchgeführt werden können und gute Ergebnisse liefern.

Weitere Messverfahren wie Triangulation oder Orthogonalverfahren wurden nur theoretisch behandelt und nicht in der Praxis durchgeführt. Da es sich um bewährte Messverfahren handelt, erschien eine gesonderte Erprobung dieser Verfahren überflüssig, zumal sie in der forstlichen Vermessung nicht der Regelfall sind.

5.1.3. Einhängen ins Landeskoordinatennetz

Das Einhängen der vermessenen Geometrien in das Landeskoordinatennetz gestaltete sich bei den Messungen im Kranzberger Forst und in Hohenschäftlarn vergleichsweise einfach. Im Kranzberger Forst war durch die Messungen von HOFFMANN (2005) ein Punkt bekannt, der zum Einhängen verwendet werden konnte. In Hohenschäftlarn war der Aufnehmende Rahm vom Waldbesitzer eingewiesen worden. Der Grenzverlauf und die Lage der Grenzsteine waren daher bekannt. Beide Grenzsteine befinden sich in der Nähe der aufzunehmenden Flächen, da sich die Grundstücksform sich lang und schmal gestaltet. Außerdem stand die digitale Flurkarte zur Verfügung, aus der die Koordinaten der Grenzsteine mit hoher Genauigkeit abgegriffen werden konnten.

Im Kleinprivatwald sind solche Bedingungen sicher oft vorzufinden, da davon auszugehen ist, dass die Waldbesitzer die Besitzgrenze und deren Vermarkungen im Regelfall kennen. Im Großprivatwald, aber auch im Kommunal- oder Staatswald ist es jedoch nicht immer der Fall, dass eine permanente Vermarkung in unmittelbarer Nähe zur aufzunehmenden Fläche vorhanden ist. Hier kann man sich gegebenenfalls mit einem GPS-Gerät behelfen, mit dem dann ein Einhängepunkt ermittelt wird. Bei Verwendung eines GPS-Gerätes aus der Low-Cost Geräteklasse ist hier jedoch mit höheren Lageungenauigkeiten zu rechnen. Steht ein High-End Gerät zur Verfügung, kann auch die gesamte Geometrie mit diesem Gerät vermessen werden.

In vielen Fällen ist das Einhängen ins Landeskoordinatennetz gar nicht erforderlich. Sind nur die Flächenform und -größe interessant, wie es beispielsweise bei der Vermessung förderfähiger Kulturflächen der Fall ist, kann das Einhängen unterbleiben. Die Auswertung erfolgt dann in einem lokalen Koordinatensystem. Wichtig ist das Einhängen in ein übergeordnetes Koordinatensystem immer dann, wenn die Position der aufgenommenen Geometrien von Bedeutung ist. Das ist dort der Fall, wo die Geometrie später von Dritten wieder aufgesucht werden muss oder wenn sie zusammen mit anderen Daten in einer Geodatenbank gespeichert werden soll.

5.2. Lage- und Flächenfehler

5.2.1. Beurteilung der Lagetreue der Punkte

Die Lagetreue der Punkte bei den Messungen der Flächen im Kranzberger Forst wird für forstliche Zwecke als gut beurteilt. Für eine Präzisionsmessung ist diese Genauigkeit jedoch nicht ausreichend. Für eine Solche wären hochgenaue Messgeräte erforderlich. Der größte Lagefehler beträgt drei Meter, bei einer Unsicherheit der Referenzpunkte von einem halben Meter. Die Messung wurde gewissenhaft, aber von einer Person ohne Messerfahrung durchgeführt. Es wird angenommen, dass ein geübter Revierleiter noch bessere Ergebnisse erreicht. Die Ergebnisse der Messungen mit der Bussole sind nicht wesentlich genauer als die Messungen mit dem Kompass. Der Grund hierfür ist vermutlich in der Längenmessung zu suchen, die aufgrund der verwendeten Messgeräte mit höheren Unsicherheiten behaftet ist. Auffallend ist, dass das Minimum der Lageabweichungen bei der Messung mit dem Bandmaß bei null liegt. Dies ist darin begründet, dass der Instrumentenstandpunkt aus eben den Messergebnissen des Bandmaßes berechnet wurde.

5.2.2. Beurteilung der Längen- und Flächentreue

Die erreichte Flächentreue im Kranzberger Forst ist ebenfalls für forstliche Zwecke ausreichend. Der relativ hohe prozentuale Fehler, der bei Fläche E auftrat, hat seinen Ursprung in der fehlertheoretisch ungünstigen, langgestreckten Form. Hierdurch wirken sich bereits kleine Fehler proportional stark aus. Bei der Fläche D sind bei der Messung mit dem Ultraschallmessgerät vermutlich an der Längsseite im Osten relativ hohe Streckenfehler aufgetreten. Dies wird aus dem Vergleich zur Messung mit dem Fadenmessgerät geschlossen und führt zu weniger zufrieden stellenden Ergebnissen. Insgesamt gesehen sind die Fehlerwerte jedoch in einem akzeptablen Bereich.

5.2.3. Vergleich der Ergebnisse mit Hamberger/Zander

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind mit den Ergebnissen von HAMBERGER (2001) und ZANDER vergleichbar, da es sich um die gleichen Flächen handelt. Die Lage der Eckpunkte ist zwar nicht identisch mit der Referenzfläche dieser Arbeit, die Flächenformen und –größen sind jedoch sehr ähnlich. Die Bestandesverhältnisse haben sich im Zeitraum zwischen beiden Messungen zwar etwas verändert, eine grundsätzliche Vergleichbarkeit ist jedoch gegeben (vgl.: Tabelle 3-1).

Betrachtet werden die Mittelwerte der Umfangs- und Flächenfehler getrennt nach der verwendeten Messgerätekombination. Es zeigt sich, dass die Fehler in einer vergleichbaren Größenordnung liegen und bei etwa einem Prozent zu finden sind. Die Flächenfehler sind im Vergleich zu den Umfangsfehlern höher. Die Unterschiede der Messgenauigkeiten der einzelnen Messgeräte sind auf die jeweilige Gerätegenauigkeit zurückzuführen. Hiermit wird bestätigt, dass bei gewissenhafter Durchführung von polaren Aufnahmen ein mittlerer Flächenfehler von etwa einem Prozent zu erwarten ist. Die Messgenauigkeiten von Einzelmessungen können davon abweichen.

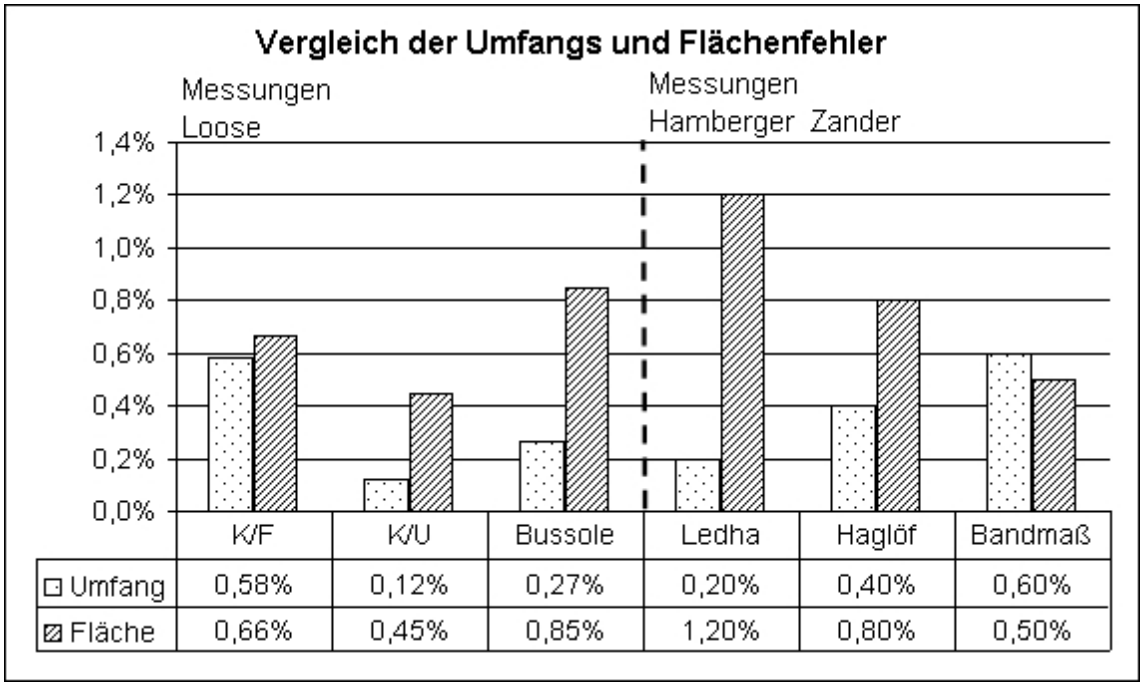


Abbildung 5.2-1 Vergleich der Mittelwerte Umfangs- und Flächenfehler mit Hamberger / Zander

5.3. Zeitbedarf

5.3.1. Wertung der Zeitstudie in Hohenschäftlarn

Der Zeitbedarf für die Messungen in Hohenschäftlarn kann als repräsentativ für polare Aufnahmen angesehen werden. Es ist jedoch schwierig, allgemeingültige Werte für den Zeitbedarf anzugeben, denn er hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Eine Messung auf einer Freifläche im Flachland wird im Allgemeinen weniger Zeit in Anspruch nehmen als eine Messung in mannshoher Naturverjüngung oder im Gebirge. Besteht keine Sichtverbindung zwischen zwei Aufnahmepunkten und muss diese erst hergestellt werden, so ist mit einem nicht unerheblichen, zusätzlichen Zeitaufwand zu rechnen. Im folgenden Abschnitt werden die in Hohenschäftlarn ermittelten Zeiten mit denen anderer polarer Aufnahmen sowie mit GPS-Messungen verglichen.

5.3.2. Vergleich der Zeitstudie mit den Ergebnissen von Hoffman und Hamberger/Zander

Die in dieser Arbeit ermittelten Messzeiten sollen mit den Ergebnissen von HAMBERGER (2001) und ZANDER sowie mit den ermittelten Werten von HOFFMANN (2005) verglichen werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Zeitstudien an jeweils verschiedenen Orten mit unterschiedlichen Voraussetzungen für die Messung erfolgten.

HAMBERGER und ZANDER führten die Zeitstudie in Kreuth, also im Hochgebirge durch. Hieraus ergeben sich erschwerte Bedingungen für die Messungen, was sich auf die Messzeiten auswirkt. Die Vermessung wurde ferner im Zwei-Mann-Verfahren durchgeführt, die Zeit für die Nachbereitung der Daten ging nicht in die Auswertung mit ein. Nimmt man die Mittelwerte der mit den Messgeräten von Ledha und Haglöf durchgeführten Messungen, so ergibt sich eine durchschnittliche Messzeit von rund zwei Minuten pro Punkt oder rund acht Minuten pro 100 Laufmeter.

HOFFMANN führte seine Zeitstudie bei der Aufnahme der Flächen an der Waldklimastation im Kranzberger Forst durch. Er berücksichtigte sowohl die Rüstzeiten als auch die Nachbereitungszeit der Daten, sowie die notwendige Initialisierungsphase der GPS-Geräte. Er errechnete für die GPS-Geräte der Low-Cost Klasse einen Zeitbedarf ab drei Minuten pro Pfosten. Für Geräte der High-End Klasse ergaben sich Zeiten zwischen fünf und acht Minuten pro Pfosten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind, wie in Abschnitt 4.3.2 dargelegt, vier Minuten pro Aufnahmepunkt oder zwölf Minuten pro 100 Laufmeter jeweils ohne Rüstzeit. Werden die Rüstzeit und die für die Nachbereitung der Daten benötigte Zeit mit berücksichtigt, so ergibt sich

eine durchschnittliche Messdauer von sechs Minuten pro Aufnahmepunkt oder 22 Minuten pro 100 Laufmeter.

Der Vergleich zeigt, dass HAMBERGER und ZANDER, selbst unter den erschwerten Bedingungen des Hochgebirges, rascher Messen konnten als es bei dieser Arbeit der Fall war. Berücksichtigt man jedoch, dass diese Aufnahmen im Zwei Mann Verfahren durchgeführt wurden und verdoppelt aufgrund dessen die angegebenen Zeiten, so ist die Messzeit pro Punkt identisch. Die Zeit pro hundert Laufmeter ist bei den Aufnahmen von HAMBERGER und ZANDER dahingegen etwas höher. Dies kann darin begründet liegen, dass Laufwege im Hochgebirge einen höheren Zeitaufwand bedingen als im Flachland.

Im Vergleich zu den GPS-Messungen von HOFFMANN (2005)liegt der Zeitbedarf für die polare Aufnahme gleichauf mit dem für Messungen mit GPS-Geräten im unteren Drittel der High-End Geräteklasse. Die beiden Zeitstudien wurden zwar auf unterschiedlichen Flächen durchgeführt, sind jedoch trotzdem gut vergleichbar. Beide beinhalten sowohl Messungen mit Freiflächencharakter als auch im Bestand. Beide Studien wurden im Flachland durchgeführt und es wurden die Rüstzeit, sowie die Nachbereitung der Daten berücksichtigt.

5.4. Externe Daten

5.4.1. Ergebnisse

Die eingesandten Flächen geben eine Vorstellung davon, in welchem Bereich sich die Flächengrößen und die Messfehler typischerweise bewegen und wie sie verteilt sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass überwiegend Flächen bis etwa einem Hektar Größe gemessen wurden. Flächen über zwei Hektar kommen nur vereinzelt vor. Aus den Anmerkungen zu den Daten von Person 2 geht hervor, dass die überwiegende Zahl der Aufnahmen auf der Freifläche stattfand, wo teils mannshohe Naturverjüngung die Messungen erschwerte.

Die Längenabschlussfehler lagen stets unter fünf Prozent, wobei zehn Prozent der Messungen über zwei Prozent lagen. Hierzu ist zu sagen, dass die Förster explizit dazu aufgefordert wurden, alle Messungen einzusenden, also auch solche, die mit Messfehlern in einer nicht mehr zu tolerierenden Größenordnung behaftet sind. Solche Messungen wurden in der Praxis wiederholt, wie sich beispielsweise an Fläche 73 zeigt, die zunächst einen Abschlussfehler von über vier Prozent aufwies. In einer Anmerkung wird eine Fehlfunktion des Fadenmessgerätes vermutet. Fläche 74 ist die Wiederholung dieser Messung mit neu eingelegtem Faden. Hier beträgt der Abschlussfehler weniger als ein Prozent.

Der Vergleich der Längenfehler aufgeschlüsselt nach Personen zeigt, dass es durchaus Unterschiede in der Messgenauigkeit gibt. Es liegt nahe, dass die Fertigkeiten und die Gewissen-

haftigkeit des Aufnehmenden einen Einfluss auf die Präzision der Messung haben. Allerdings ist bei keiner Person eine deutliche Verschiebung in den Bereich über zwei Prozent relativen Längenfehlers festzustellen.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Abschlussfehler und Anzahl der Eckpunkte, Flächengröße, Umfang oder Formzahl ließ sich nicht feststellen. Es zeigt sich jedoch mit zunehmender Größe und Komplexität eine Tendenz zu einer ebenfalls größeren Fehlerwahrscheinlichkeit.

Die Tatsache, dass bei den vorliegenden Daten neun von zehn Flächen Längenfehler unter zwei Prozent aufwiesen, zeigt, dass Genauigkeiten in diesem Bereich bei durchschnittlichen Flächen und Bedingungen die Regel sind.

5.4.2. Vergleich der Flächengrößen „Fläche 1.0“ und Aequometer

Der Vergleich der Flächengrößen, die vom Programm „Fläche 1.0“ und vom Aequometer berechnet wurden (Abschnitt 4.4.2), deckte teilweise deutliche Abweichungen auf. Rechnerische Fehler bei der Flächengrößenermittlung lassen sich bei beiden Programmen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen, da diese umfangreich getestet wurden und in der Praxis eingesetzt werden. Außerdem wurde in Abschnitt 4.1.1 gezeigt, dass sich die Flächenberechnung des Aequometers mit der von „Demo Tools“ deckt. Die unterschiedliche Behandlung von Nachkommastellen im Aequometer und „Fläche 1.0“ könnte eine gewisse Rolle spielen. Da bereits Zwischenergebnisse unterschiedlich gerundet werden, wirkt sich das umso deutlicher auf das Endergebnis aus. Die festgestellten Abweichungen lassen sich jedoch nicht ausschließlich durch Rundungsfehler erklären. Es ist auffällig, dass die Abweichungen umso ausgeprägter werden, je höher der Abschlussfehler der Messung ausfällt. Dies lässt darauf schließen, dass die rechnerische Behandlung des Messfehlers des Programms „Fläche 1.0“ sich nicht mit den Berechnungsmethoden des Aequometers deckt. Leider ist dem Autor der genaue Rechenweg des Programms „Fläche 1.0“ nicht bekannt.

Es ist nicht möglich, aus den vorliegenden Ergebnissen darauf zu schließen, welcher Berechnungsweg die reale Fläche besser wiedergibt, denn es liegen keine genauen Referenzmessungen vor. Es konnte allerdings deutlich gezeigt werden, dass sich die Flächengrößen voneinander unterscheiden, je nachdem, welche Berechnungsmethode verwendet wird. Wie hoch diese Unterschiede sind, hängt wohl vor allem von der Flächenform und der Verteilung der realen Messfehler ab. Die Flächendifferenzen zwischen den Berechnungsmethoden sind jedoch erst bei Abschlussfehlern von über zwei Prozent deutlich zu erkennen. Bei gewissenhafter Aufnahme und günstigen Aufnahmebedingungen sollten zwei Prozent Abschlussfehler in jedem Fall unterschritten werden. Daher sind die genannten Abweichungen zwischen den Berechnungsmethoden für die Praxis nicht erheblich.

5.5. Aussagekraft der Ergebnisse der simulierten Flächen

Da die verwendeten Daten nicht exakt der Realität entsprechen, sind die Ergebnisse naturgemäß nicht eins zu eins in die Praxis übertragbar. Die Übereinstimmung der simulierten Daten mit den von Revierleitern gemessenen Flächen wurde jedoch überprüft und als ausreichend gewertet, um gewisse Grundaussagen treffen zu können.

Hierzu gehören die Auswirkung der streckenproportionalen Fehlerverteilung auf die Lagetreue der Punkte und die Flächentreue der Geometrie. Ersteres wurde auch anhand der in Kranzberg erhobenen Daten überprüft und bestätigt. Es kann daher als bestätigt gelten, dass die Fehlerverteilung die Messwerte im Mittel verbessert. Fälle in denen eine Verschlechterung der Daten eintritt sind nicht ausgeschlossen, kommen aber selten vor.

Der Zusammenhang zwischen den Messunsicherheiten und dem resultierenden Flächenfehler ist ebenfalls sinngemäß auf die Praxis übertragbar, wobei jedoch eine durch die Simulationsparameter bedingte Unsicherheit berücksichtigt werden muss.

Es hat sich in der Simulation gezeigt, dass anhand der berechneten Fehlerwerte keine sichere Aussage über die Höhe des tatsächlichen Flächenfehlers getroffen werden kann. Eingangsparameter waren normalverteilte Messfehler, die lediglich Geräteungenauigkeiten simulieren. In der Praxis sind die Fehlerursachen jedoch vielfältig, wie im ersten Teil dieser Arbeit beschrieben wurde. Fehler deren Ursache nicht in der Genauigkeit der Messgeräte liegt können auftreten und zu einer erheblichen Veränderung der Geometrie führen. Allerdings kann für derartige Fehler keine allgemeine Verteilung angegeben werden, eben weil ihre Ursachen verschieden sind. Es hat sich gezeigt, dass Messungen die nur mit Fehlern im Bereich der Gerätegenauigkeit behaftet sind, sehr niedrige Flächenfehler aufweisen. Außerdem stellte sich heraus, dass einzelne hohe Messfehler treffsicher erkannt werden. Erklärbar wird dieses Verhalten durch die den Fehlern zugrunde liegende Verteilung. Die simulierten Fehler sind symmetrisch verteilt und haben den Mittelwert null, was dazu führt, dass sich Fehler gegenseitig aufheben und deshalb nicht im Abschlussfehler niederschlagen. Trotzdem wird die Geometrie verändert, was dann nicht erkannt wird. Einzelne gröbere Fehler wirken sich dahingegen direkt auf den Abschlussfehler aus und werden erkannt. Ist nur ein einziger Winkel- oder Streckenfehler aufgetreten, kann dieser sogar berechnet werden. Dies ist für die Praxis jedoch nicht anwendbar, da es nie auszuschließen ist, dass weitere Fehler aufgetreten sind.

Die Simulation hat sich weiterhin gezeigt, dass ein hoher Anteil an korrekten Aussagen der berechneten Fehlerwerte immer dann auftritt, wenn die Messfehler gering sind und die akzeptierten Grenzen hoch. Auf die Praxis übertragen bedeutet dies dass bei gewissenhafter Messung niedrig berechnete Messfehler ausgegeben werden. Hier lässt sich anhand der Simulation keine eindeutige Grenze für den berechneten Wert angeben. Vergleicht man für unter-

schiedlichen Messunsicherheiten die Mittelwerte der berechneten und der realen Fehler, so lässt sich auf deren Größenordnung schließen.

Für die Verwendung der Fehlerwerte in der Praxis bedeutet dies, dass die exakte Höhe der berechneten Fehler wenig Aussagekraft hat. Die Größenordnung kann jedoch als Anhaltspunkt für die Präzision der Messung gelten. Außerdem werden grobe Fehler sicher erkannt. Die bisherige Anzeige der berechneten Fehlerwerte wird daher beim nächsten Update im Juli geändert, um eine Überbewertung des exakten Wertes des angezeigten Flächenfehlers zu vermeiden.

5.6. Vergleich der polaren Aufnahme mit der GPS-Messung

Um förderfähige Kulturflächen zu vermessen, stehen den bayerischen Forstbeamten derzeit prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Wahl: Die Vermessung als polare Aufnahme und die Messung mit High-End GPS-Geräten. Diese beiden Verfahren sollen hinsichtlich der zu erwartenden Genauigkeit und des Zeitbedarfes gegenübergestellt werden, die wichtigsten Vor- und Nachteile beider Verfahren sollen genannt und der typische Einsatz in der Praxis beleuchtet werden.

5.6.1. Genauigkeit von GPS-Geräten im Vergleich zur polaren Aufnahme

WOESSNER (2007) schreibt zur Genauigkeit von GPS-Geräten: „Ein typischer GPS Empfänger für die zivile Nutzung bietet heute eine Genauigkeit von bis zu wenigen Metern. Hierbei fällt jedoch die Anzahl der empfangen[en] Satelliten und die Geometrie stark ins Gewicht, so dass im praktischen Gebrauch Genauigkeiten um 20 Meter erwartet werden können. Ausgefeiltere und teure GPS-Empfängersysteme wie sie für die Landvermessung Verwendung finden kosten mehrere tausend Euro und erreichen Genauigkeiten im Zentimeter-Bereich.“, und weiter unten: „Mit Hilfe einer "Differenzielles GPS" genannten Technik (DGPS) können jedoch auch zivile Empfänger Genauigkeiten von fünf bis manchmal unter einem Meter erreichen.“ Die typische DGPS Genauigkeit wird mit drei bis fünf Metern angegeben. Außerdem wird noch auf die Bedeutung der Genauigkeitsanzeige bei Garmin GPS-Geräten eingegangen, die in der Praxis oft fälschlicherweise als absolute Genauigkeit interpretiert wird: „Die Anzeige bezieht sich auf die sogenannte 50 % CEP (Circular Error Probable). Das heisst, dass sich 50 % aller Messungen in einem Kreis mit dem angegeben Radius befinden […] 95 % aller Messpunkte innerhalb eines Kreises mit dem doppelten angegebenen Radius […] 98,9 % der Messungen in einem Kreis mit dem 2,55 fachen Radius.“

Die Genauigkeit eines GPS-Gerätes lässt sich nur schwer in absolute Zahlen fassen, da das Ergebnis also, neben der verwendeten Geräteklasse und Korrektur, auch stark von äußeren Einflüssen wie Anzahl der Satelliten im Empfangsbereich, der Satellitengeometrie und von empfangseinschränkenden Einflüssen wie Überschirmung und Abschattung abhängig ist. Jede Messung ist ein statistischer Mittelwert mehrerer gemessener Lagewerte. Daher verbessert sich das Ergebnis bei Langzeitmessung am gleichen Punkt. Ein Problem ist die Flächentreue bei kleinen Flächen. Da alle Einzelpunkte voneinander unabhängig gemessen werden, ist die Unsicherheit der Lage der Punkte unabhängig von der Flächengröße. Daraus folgt, dass der relative Flächenfehler mit zunehmender Flächengröße abnimmt. Dies bedeutet wiederum dass kleine mit GPS vermessene Flächen systembedingt höhere Flächenfehler aufweisen.

Nimmt man die oben genannte Lagetreue von drei bis fünf Metern bei der Messung mit High-End GPS-Geräten unter Nutzung eines Korrektursignals als Basis, so lässt sich feststellen,

dass die Genauigkeit einer polaren Aufnahme mindestens genau so gut ist. Ohne Korrektursignal oder bei ungünstigen Bedingungen liefert das GPS-Gerät eine deutlich weniger genauere Position als die polare Aufnahme. Bedingt durch die Verkettung der gemessenen Vektoren nimmt die Genauigkeit von polaren Aufnahmen mit einer zunehmenden Komplexität der Fläche ab. Bei kleinen Flächen mit wenigen Eckpunkten, wie sie bei der Vermessung förderfähiger Kulturflächen häufig auftreten, werden von der polaren Aufnahme geringere relative Flächenfehler erzielt als bei der GPS-Messung.

5.6.2. Vergleich der Ergebnisse mit Hoffmann

HOFFMANN (2005) hat die gleichen Flächen an der Waldklimastation Freising aufgenommen, die auch in dieser Arbeit vermessen wurden. Es wurden ferner identische Referenzflächen genutzt und die Bestandesverhältnisse sind ähnlich. Daher sind die polaren Aufnahmen dieser Arbeit und die GPS-Messungen von HOFFMANN (2005) direkt vergleichbar. Verglichen wurden die Mittelwerte und Maxima über alle Messungen hinweg und aufgeschlüsselt nach Messgerätekombination. Die Daten von HOFFMANN (2005) sind nach Geräteklasse – High-End oder Low-Cost – sortiert dargestellt.

Bei der Betrachtung der Lageabweichung (Abbildung 5.6-1) zeigt sich, dass die Lagetreue der polaren Aufnahmen im gleichen Bereich wie die der der High-End GPS-Geräte liegt, die in Verbindung mit einem Korrekturdatendienst eingesetzt wurden. Die Lageabweichung der unkorrigierten GPS-Messungen, sowie die der Geräte aus dem Low-Cost Bereich liegen deutlich höher als die der polaren Aufnahmen.

Abbildung 5.6-2 zeigt den Vergleich der Umfangs- und Flächenfehler. Auch hier bewegen sich die polaren Aufnahmen und die High-End GPS-Geräteklasse im gleichen Bereich. Der alleinige Vergleich von Mittelwerten und Maxima über alle Messungen hinweg lässt keine gesicherten Aussagen über die tatsächlichen Einzelfehler zu. Zum gegenüberstellenden Vergleich der Messverfahren ist diese Darstellungsform jedoch geeignet. Es bestätigt sich wiederum, dass die Genauigkeit der typischen polaren Aufnahme sich im gleichen Bereich wie die Genauigkeit hochwertiger GPS-Geräte mit Korrektursignal bewegt.

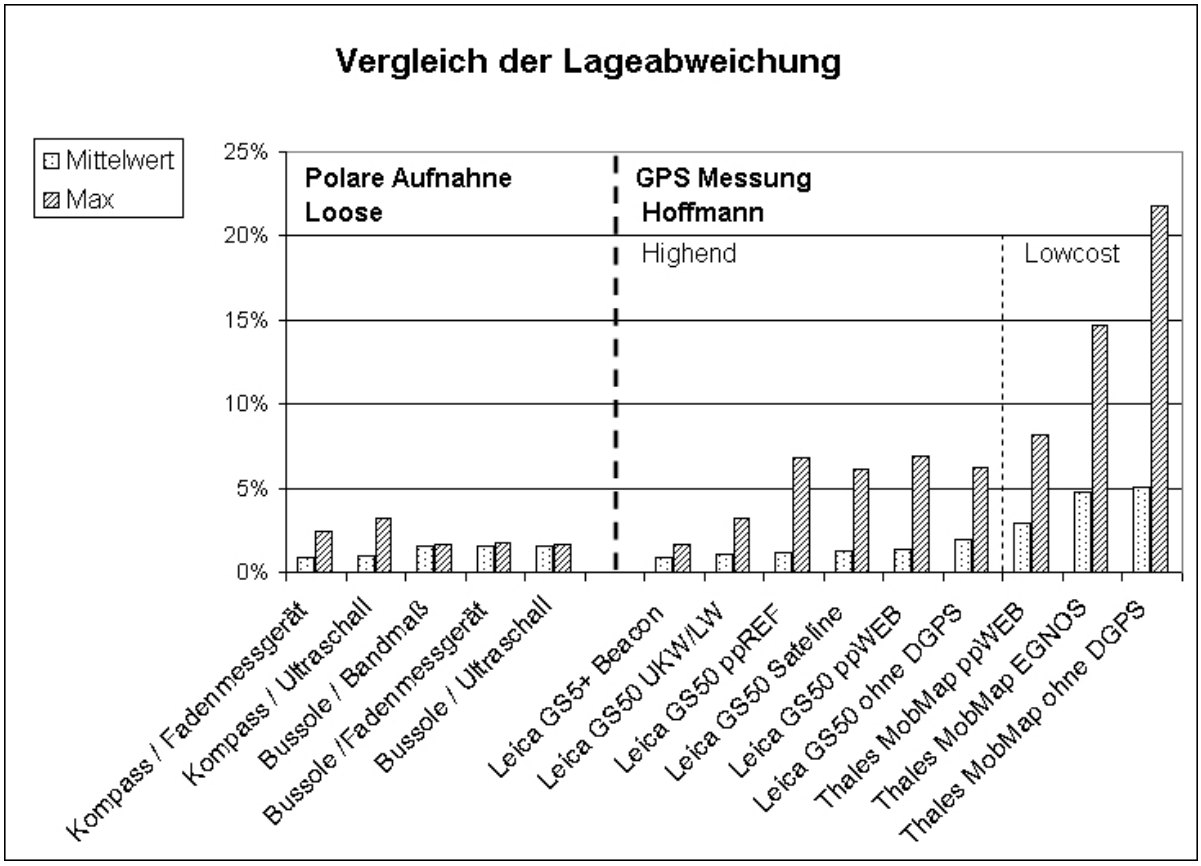


Abbildung 5.6-1 Vergleich der Lageabweichungen polare Aufnahme / GPS

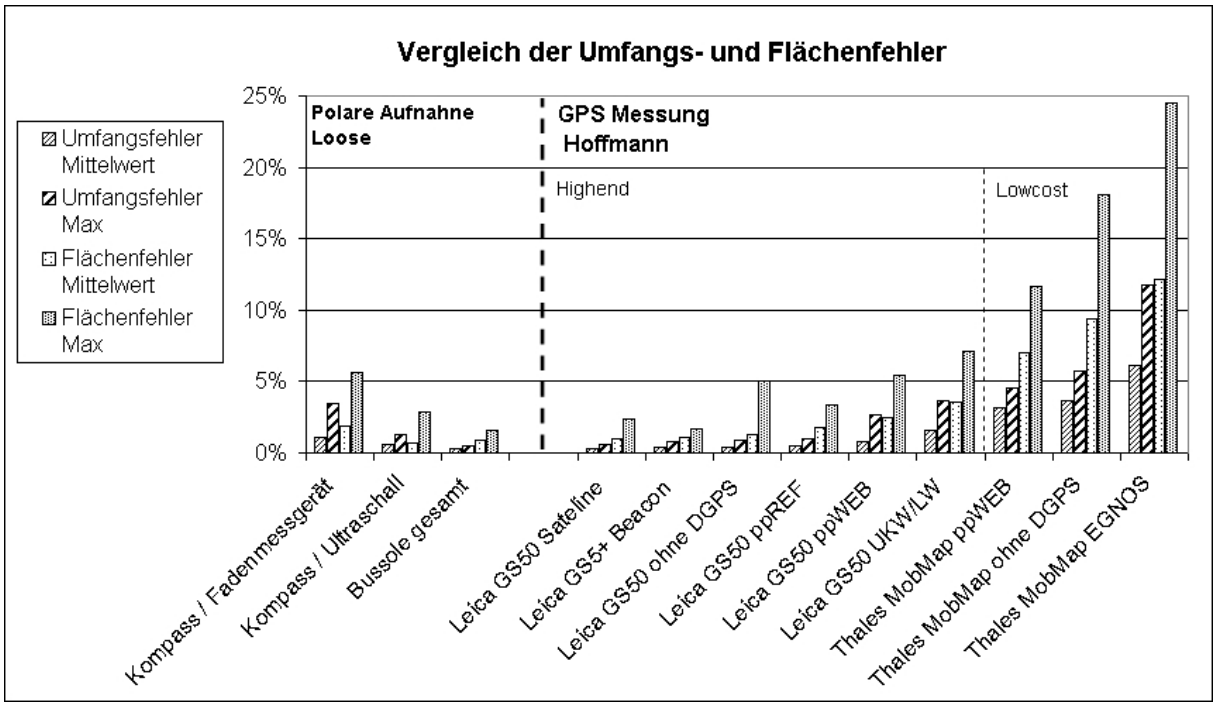


Abbildung 5.6-2 Vergleich der Umfangs- und Flächenfehler polare Aufnahme / GPS

5.6.3. Befragung der QBF

Da sich in der Literatur und in den Herstellerangaben verschiedener GPS-Geräte nur wenige Informationen zum Zeitbedarf einer GPS-Messung finden, wurden hierzu Personen befragt, die beruflich solche Messungen durchführen. Dafür wurden im April 2008 fünf zufällig ausgewählte Qualitätsbeauftragte für Förderung (QBF) an den ÄLF in Bayern telefonisch befragt. Namentlich waren dies Rainer Bellmeier vom ALF Straubing, Ilka Bockenheimer vom ALF Würzburg, Dietmar Gross vom ALF Coburg, Andreas Hermer vom ALF Pfaffenhofen und Albert Rauch vom ALF Rosenheim. Diese Personen wurden um ihre persönliche Einschätzung des Zeitbedarfs bei der GPS-Messung gebeten, der in „Messzeit pro Punkt“ und „Rüstzeit pro Maßnahme“ gegliedert wurde. Es ergaben sich sehr informative Gespräche, in denen auch wichtige Vor- und Nachteile beider Verfahren genannt wurden. Bei den gemachten Aussagen handelt es sich um Erfahrungswerte aus der Praxis und nicht um wissenschaftliche Untersuchungen im engeren Sinne. Die Einschätzungen sind durch die individuellen Arbeitsbedingungen beeinflusst, die sich durchaus voneinander unterscheiden.

5.6.4. Zeitbedarf bei der GPS-Messung im Vergleich zur polaren Aufnahme

Alle Befragten waren der Ansicht, dass der Zeitbedarf pro Punkt, also für eine Einzelmessung, schwer anzugeben sei. Bei guten Bedingungen seien Zeiten von unter einer Minute pro Messung möglich. Bei ungünstigen Bedingungen hingegen kann die Einzelmessung bis zu einer viertel Stunde dauern. Die Anzahl der Satelliten im Empfangsbereich und deren Geometrie war hierbei einer der meistgenannten Faktoren. 12 bis15 Satelliten würden einen guten Wert darstellen. Die Geometrie wird durch den DOP Wert (für dilution of precision) ausgedrückt. Mit dem Almanach lässt sich voraussagen, wann günstige Satellitenkonstellationen herrschen. In der Praxis war es allerdings nicht allen Personen möglich, solche Voraussagen gewinnbringend zu nutzen. Dies könnte gegebenenfalls durch gezielte Schulungen verbessert werden. Weiterhin hängt die Zeit der Einzelmessung auch von den Gegebenheiten im Gelände, sprich vom Grad der Abschattung und Überschirmung ab, der sich wiederum auf die Anzahl der empfangbaren Satelliten und die Signalqualität auswirkt. Im Einzelfall kann ein Punkt überhaupt nicht direkt vermessen werden. Er muss dann extern, beispielsweise nach dem Bogenschnittverfahren eingemessen werden, was entsprechend mehr Zeit in Anspruch nimmt. Das kommt allerdings nur selten vor, Herr Hermer berichtet von insgesamt nur zwei Fällen. Es lässt sich also festhalten, dass der Zeitbedarf pro Messpunkt in Abhängigkeit von den Gegebenheiten stark schwankt. Daher kann auch kein Mittelwert angegeben werden.

Der als „Rüstzeit pro Aufnahme“ bezeichnete Wert fasst alle Arbeitsabschnitte zusammen, die nicht das Messen direkt betreffen. Ausgenommen sind die Anfahrtszeiten und Laufwege zur Fläche, da diese vom Messverfahren unabhängig sind. Für die Messung einer Förderfläche ist es zunächst notwendig, die Attribute der Fläche in die EDV einzutragen. An den ÄLF

in Bayern, wird dafür das Excel Tabellenblatt „Vor Ort Kontrolle Übersichtsliste“ verwendet. Diese Daten werden dann mit einer speziellen Software dem „IShape Viewer“ auf das GPS-Gerät überspielt. Nach der Messung wird diese Software dafür verwendet, um die gemessene Geometrie aus dem GPS-Gerät auszulesen und aufzubereiten. Die Aufbereitung der Daten umfasst unter anderem die über ein Orthofoto gelegte Darstellung. Die Luftbilder werden bei Bedarf aus dem Netzwerk geladen, was einige Minuten dauern kann. Für diese Abschnitte wurden Zeiten von 15 Minuten bis zu einer Stunde und im ungünstigsten Fall sogar noch mehr genannt. Setzt man eine funktionsfähige EDV und einen geschulten Anwender voraus, dürften diese Aufgaben in weniger als einer halben Stunde zu schaffen sein.

Vergleicht man die bei der GPS-Messung notwendige Zeit für die Dateneingabe und Aufbereitung mit der für die Auswertung polarer Aufnahmen erforderliche Zeit, so erhält man ähnliche Zeitspannen. Auch bei der Auswertung polarer Aufnahmen müssen die Flächenattribute eingegeben, die Messwerttabelle abgetippt, die Fläche gespeichert, exportiert und in Drittsoftware eingelesen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Messung in Hohenschäftlarn, bei der die Auswertung einschließlich Hochfahrens des Laptops 21 Minuten dauerte. In der Praxis werden die Flächen selten exportiert und weiterverarbeitet, da sich nur selten ein bekannter Punkt in der unmittelbaren Nähe der Messfläche befindet. Da eine lagerichtige Darstellung in einem übergeordneten Koordinatensystem für förderrelevante Zwecke nicht gefordert ist, wird auf die Auswertung und Archivierung mittels weiterer Software meist verzichtet. Daher ist der Zeitbedarf für die Auswertung der polaren Aufnahme im Regelfall geringer als der Zeitbedarf für die Auswertung von GPS-Messungen.

Bei der GPS-Messung entstehen auf dem Messgelände zusätzliche, technisch bedingte Wartezeiten. Es dauert eine gewisse Zeit bis das GPS-Signal empfangen wird und das Messgerät eine korrekte Position anzeigen kann. Außerdem muss sichergestellt werden, dass das Empfangsgerät für das Korrektursignal „Beacon“ vorbereitet ist und korrekten Empfang hat. Auch diese Zeiten sind von verschiedenen Faktoren abhängig und sehr unterschiedlich. Es wurde von Fällen berichtet, in denen fast eine Stunde auf das Signal gewartet werden musste.

Die sonstige Vorbereitung der Technik, wie die Lagerung und das Laden der Akkus, nimmt vergleichsweise wenig Zeit in Anspruch. Es wird davon ausgegangen, dass sich auch hier die Zeiten in etwa die Waage halten mit den für die polare Aufnahme notwendigen technischen Vorbereitungen.

Frau Bockenheimer teilte mit, dass der Zeitaufwand der GPS-Messung durch die Einführung des Gerätes EGMS2 deutlich gesunken sei. Bei guten Bedingungen ließen sich GPS-Messungen schneller durchführen als polare Aufnahmen, zumal Laufwege günstiger gelegt und Hindernisse umgangen werden können.

5.6.5. Wichtige Vor und Nachteile beider Verfahren

Der Aequometer wurde als Werkzeug zur Auswertung polarer Aufnahmen von den Anwendern sehr begrüßt. Er ermöglicht eine rasche und unkomplizierte Auswertung der erhobenen Daten und bietet darüber hinaus die Möglichkeit des Datenexports, was die Weiterverarbeitung in Drittsystemen möglich macht. Das Messverfahren an sich ist bekannt und bewährt und hat eine für forstliche Zwecke sehr gute Genauigkeit. Es kann mit einfachen mechanischen Geräten unkompliziert durchgeführt werden. Die Wahrscheinlichkeit von technischen Problemen oder Anwenderfehlern ist vergleichsweise gering und die Ergebnisse sind zuverlässig.

Allerdings muss bei der Messung immer Sichtverbindung von Punkt zu Punkt gegeben sein, die in der Praxis oftmals erst hergestellt werden muss. Bei der Aufnahme nach dem Verfahren des geschlossenen Polygons ist man außerdem dazu gezwungen, die Fläche an ihren Kanten zu umschreiten. Hier bietet eine Messung mit GPS-Geräten Vorteile, da Laufwege günstiger gelegt werden können. Ein weiteres Problem bereitet das Einhängen polar aufgenommener Flächen in das Landeskoodinatensystem, da die notwendigen Einhängepunkte oft nicht vorhanden oder nicht bekannt sind. Weil ein Einhängen nicht gefordert ist, unterbleibt es zumeist. Die Position der Fläche ist dann nur durch die Besitzgrenzen des Antragstellers definiert.

Die Vorteile der GPS-Messung kann man mit den Worten von Herrn RAUCH zusammenfassen: „Bei guter Vorbereitung und Prüfung des Almanachs ist eine vergleichsweise einfache, schnelle und problemlose Messung möglich.“ Die Einführung des Gerätes EGMS2 hat die GPS-Messung laut mehreren übereinstimmenden Aussagen verbessert. Mit dem GPS-Gerät könne die Aufnahme und Kontrolle einer Förderfläche in einem Schritt erfolgen. Allerdings sei die Lern- und Übungsschwelle zur Anwendung der GPS-Messgeräte hoch. Die Geräte sind, verglichen mit den mechanischen Instrumenten der polaren Aufnahme, anfälliger für Anwenderfehler und technische Störungen. Außerdem wurde auf technische Probleme mit dem Korrekturdatendienst „Beacon“ hingewiesen. Der finanzielle Aufwand für die Gerätebeschaffung und –wartung, sowie für die Schulung der Anwender ist wesentlich höher als der entsprechende Aufwand für die polare Aufnahme. Daher kann auch auf Revierleiterebene nicht stets auf GPS-Geräte zurückgegriffen werden. Bei kleineren Flächen ist der Flächenfehler wie bereits erwähnt wurde systembedingt hoch. Das kann zu Problemen führen, denn wie aus den externen Daten (vgl. Abschnitt 3.4.2) hervorgeht, treten kleine Flächen häufig auf.

Laut Aussage von Herrn Rauch werde die Vorerfassung der Flächen auf Revierleiterebene vorwiegend als polare Aufnahme durchgeführt. Die Kontrolle der Flächen durch die Qualitätsbeauftragten für Förderung erfolge hingegen meist mit dem GPS-Gerät.

6. Ausblick

Die polare Aufnahme ist eine vielfältig nutzbare und mit einfachen Mitteln durchführbare Methode, Geodaten zu erheben. Der Aequometer ist das passende Werkzeug zur Auswertung und Speicherung am Computer. Darüber hinaus ist eine Schnittstelle zur Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten in GIS-Systemen gegeben. Da der Aequometer lizenzkostenfrei verfügbar und quelloffen ist, kann das Programm vom Benutzer individuell auf bestimmte Einsatzzwecke optimiert werden. Rückmeldungen aus verschiedenen Teilen der Welt haben gezeigt, dass ein Bedarf nach einem solchen Programm besteht. Im Standardmodus die können die Messwerte unmittelbar nach Programmstart eingegeben und die Flächen ausgewertet werden. Der Expertenmodus erlaubt ein direktes Editieren von Koordinatenlisten, wodurch verschiedene Aufnahmeverfahren kombiniert ausgewertet werden können. Dadurch wurde der Aequometer zu einem benutzerfreundlichen und vielseitig einsetzbarem Programm.

Zur Vermessung von Förderflächen in Bayern ist derzeit der Aequometer in der Version 3.0 im Einsatz. Die Vermessung von Polygonen und alle Basisfunktionen wie Speichern und Exportieren werden bereits unterstützt. Das offizielle Release ist derzeit Version 3.2, die erweiterte Funktionen der Zeichnung bietet. Dieser Diplomarbeit liegt Version 3.4 bei, die die Berechnung aller genannten Werte beinhaltet, sowie weiteren Funktionen und Verbesserungen. Das Erscheinen der Version 3.5 ist für Mitte Juli 2008 geplant. Diese Version wird volle Kompatibilität zu Office 2007 bieten. In der aktuellen Fassung umfasst die Arbeitsmappe fünf Tabellenblätter mit über 2000 Formeln. Die programmierten Bestandteile bestehen aus 5000 Zeilen Code in 300 Unterprogrammen. Die Entwicklung weiterer Funktionen ist nicht geplant, da der vorliegende Funktionsumfang für die Auswertung polarer Aufnahmen ausreichend ist. Für die Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten sind verschiedene Lösungen auf dem Markt, unter anderem auch als freie Software. Das Projekt wird weiterhin betreut, um die Verwendbarkeit für spezielle Zwecke und auf unterschiedlichen Plattformen so weit möglich sicher zu stellen.

7. Verzeichnisse

7.1. Literaturverzeichnis

Baumann 1999 BAUMANN Eberhard: *Vermessungskunde Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure.* Band 1, 5. bearbeitete und erweiterte Auflage, Ferd. Dümmler, Bonn, 1999

Bill 1994 BILL Ralf; FRITSCH Dieter: *Grundlagen der Geoinformationssysteme.* Bd. 1, 2.Aufl., Wichmann, Heidelberg, 1994

BIPM 2006 Bureau International des Poits et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre: *The International System of Units (SI).* 8th edition, STEDI MEDIA, Paris, 2006, http://www.bipm.org/utils/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf Abruf am 25-03-2008

Deumlich 2002 DEUMLICH Fritz; STAIGER Rudolf: *Instrumentenkunde in der Vermessungstechnik.* 9. Aufl., Wichmann, Heidelberg 2002

ESRI 1998 ESRI Company: *ESRI Shapefile Technical Description – An ESRI Whitepaper*. ESRI Company, United States of America, 1998, http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf Abruf am 25-03-2008

Fröhlich 1993 FRÖHLICH Hans: *Vermessungstechnische Handgriffe - Basiswissen für den Außendienst.* 3. Aufl., Ferd. Dümmler, Bonn 1993

GPL 1991 FREE SOFTWARE FOUNDATION: *GNU GENERAL PUBLIC LICENSE, Version 2, June 1991.* Free Software Foundation, Inc., 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

Gruber 2001 GRUBER Franz J.: *Formelsammlung für das Vermessungswesen*. 10. Aufl., Wittwer, Stuttgart, 2001

Hagebusch 1981 HAGEBUSCH Alfred; ALLENBRAND Karl H. [Bearb]; GÄRTNER M. [Bearb.]: *Fachkunde für Vermessungstechniker*. 6. Aufl., Rheinland, Köln, 1981

Haglöf Sweden HAGLÖF SWEDEN AB: *Professionelle Instrumente für die Forstwirschaft- Tradition und Innovation.* Haglöf Sweden AB Box 28, Klockargatan 8, S-882 21 Långsele, www.haglofsweden.com , http://www.haglofsweden.com/PDF/haglofsweden_tys.pdf
Abruf am 25-03-2008

Haglöf 2003 HAGLÖF SWEDEN AB: *DME Users Manual Version 1.3 2003-03-20.* Haflöf Sweden, 2003

Haglöf 2002 HAGLÖF SWEDEN AB: *Users Guide Vertex III and Transponder T3.* Haglöf Sweden AB, 2002

Hamberger 2001 HAMBERGER Joachim; ZANDER Jürgen: *Entwicklung von Werkzeugen zur vereinfachten Bearbeitung von Kultur-Fordermaßnahmen im bayerischen Privatwald sowie deren Kontrolle*, unveröffentlichter Forschungsbericht. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan, 2001

Hennecke 1988 HENNECKE Fritz; MÜLLER Gerhard; WERNER Hans: *Handbuch Ingenieurvermessung – Grundlagen.* 1. Aufl., VEB, Berlin 1988

Hoffmann 2005 HOFFMANN Markus; *„Untersuchung verschiedener GPS und DGPS Empfänger zur Erfassung von Punkten, Linien und Flächen im Wald*“, Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan; Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2005

Kahmen 1997 KAHMEN Heribert: *Vermessungskunde*. 19. Aufl., Walter de Gruyter, New York, 1997

Lehr 1979 LEHR Richard: *Feldmessen im Garten- und Landschaftsbau*. 4. Aufl., Paul Parey, Berlin, 1979

Linke 2000 LINKE Wolfgang: *Orientierung mit Karte, Kompass, GPS.* 10. Aufl., Busse + Seewald GmbH, Herford, 2000

Matthews 1993 MATTHEWS Volker: *Vermessungskunde Fachgebiete Architektur – Bauingenieurwesen – Vermessungswesen.* Teil 1: 27. Aufl., B. G. Teubner, Stuttgart, 1993

Osterloh 1998 OSTERLOH Horst: *Vermessungstechnik für Garten-, Landschaftsbau und Forstwesen mit Instrumentenkunde.* 2. Aufl., Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1998

Porcupine Canvas Inc PORCUPINE CANVAS INC: ACCURACY TIPS FOR FIELDRANGER. Porcipine Canvas Inc, 33 First Ave., Box 700 Schumacher, Ontario P0N 1G0 CANADA, www.porcupinecanvas.com

Prasuhn 1995 PRASUHN, Karl B.: *Vermessungstechnik im Garten- und Landschaftsbau*. Blackwell, Berlin, 1995

Rahm 2005 RAHM, Olaf: *Wildapfel, Wildbirne und Pflaume im Wald – Eine Bereicherung für das „wohlsortierte Warenlager" Wald?*, Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan; Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2005

Schütze 2001 SCHÜTZE Bettina; ENGLER Andreas; WEBER Harald: *Lehrbuch Vermessungskunde Grundwissen*. 6. Aufl., Weber, Dresden, 2001

Woessner 2007 WOESSNER, Michael: *GPS-Infos, Erreichbare Genauigkeit ff.* http://www.kowoma.de/gps/Genauigkeit.htm
Abruf am 25-03-2008

7.2. Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 2.3-1 Horizontale Bezugsrichtungen 17
Abbildung 2.6-1 Flussbreite 21
Abbildung 2.7-1 Formen der Polygonierung 25
Abbildung 2.7-2 Polarverfahren 26
Abbildung 2.7-3 Orthogonalverfahren 27
Abbildung 2.9-1 Das Tabellenblatt „Polygon“ 32
Abbildung 2.9-2 Aufruf der Funktionen 34
Abbildung 2.9-3 Auswahl der Berechnungsmodi 35
Abbildung 2.9-4 Das Tabellenblatt „Orthogonalverfahren“ 37
Abbildung 2.9-5 Das Tabellenblatt „Trigonometrie“ 38
Abbildung 2.9-6 Beispiel für die Zeichnung 39
Abbildung 2.9-7 Funktionen zum Bearbeiten der Zeichnung 40
Abbildung 2.10-1 Reduktion von r zu r_{HZ} 43
Abbildung 2.10-4 Berechnung des Messfehlers beim Ringpolygon 44
Abbildung 2.10-5 Koordinatenberechnung mit Fehlerverteilung 46
Abbildung 2.10-6 Excel Hilfe zu ARCTAN2 47
Abbildung 3.1-1 Polare Aufnahmen im Kranzberger Forst 56
Abbildung 3.1-2 Fläche mit und ohne Hilfspunkte 61
Abbildung 3.3-1 Flächen in Hohenschäftlarn 64
Abbildung 3.5-1 Zufallspolygon 68
Abbildung 3.5-2 Ablauf der Simulation 69
Abbildung 4.1-1 Boxplots Lagetreue Kompass/Fadenmessgerät 75
Abbildung 4.1-2 Boxplots Lagetreue Kompass/Ultraschalldistanzmessgerät 75
Abbildung 4.1-3 Boxplots Lagetreue der Messungen mit der Bussole auf der Fläche B 76
Abbildung 4.1-4 Relative Umfangs- und Flächenfehler Handkompass 77
Abbildung 4.1-5 Relative Umfangs- und Flächenfehler der Messungen mit der Bussole 77
Abbildung 4.1-6, **Abbildung 4.1-7** Verbesserung Lagetreue 78
Abbildung 4.1-8 Vergleich der Messung mit und ohne Fehlerverteilung 79
Abbildung 4.4-1 Klassifiziertes Häufigkeitsdiagramm der Flächengrößen 82
Abbildung 4.4-2 Klassifiziertes Häufigkeitsdiagramm der relative Längenfehler 83
Abbildung 4.5-1 Vergleich der Simulation mit real gemessenen Daten 86
Abbildung 4.5-2 Auswirkung der Fehlerverteilung auf die Lage- und Flächentreue 87
Abbildung 4.5-3 Auswirkungen der Messunsicherheiten auf den relativen Flächenfehler 88
Abbildung 5.2-1 Vergleich der Mittelwerte Umfangs- und Flächenfehler mit Hamberger 95
Abbildung 5.6-1 Vergleich der Lageabweichungen polare Aufnahme / GPS 103
Abbildung 5.6-2 Vergleich der Umfangs- und Flächenfehler polare Aufnahme / GPS 103

7.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Reichweiten und Genauigkeiten von Laserdistanzmessgeräten 14
Tabelle 3-1 Vergleichbarkeit mit vorliegenden Arbeiten..... 57

7.4. Formelverzeichnis

Formel 1 Konstante W_{HZ} 43
Formel 2 Konstante W_{Vt} 43
Formel 3 Konstante N_{avz} 43
Formel 4 Horizontaldistanz r_{HZ} 43
Formel 5 Umrechnung polarer in kartesische Koordinaten 44
Formel 6 Gesamtfehler geschlossenes Polygon 45
Formel 7 Teilfehlerkorrektur geschlossenes Polygon 45
Formel 8 Gesamtfehler mehrfach angeschlossener Polygonzug..... 45
Formel 9 Gesamtstrecke des Abschnitts 45
Formel 10 Teilfehlerkorrektur mehrfach angeschlossener Polygonzug 45
Formel 11 Koordinaten Polarverfahren..... 46
Formel 12 Koordinaten freier oder einseitig angeschlossener Polygonzug..... 46
Formel 13 Koordinaten geschlossenes Polygon..... 46
Formel 14 Schlussvektor 47
Formel 15 Länge des Schlussvektors 47
Formel 16 Richtung des Schlussvektors 48
Formel 17 Maximale Erstreckung..... 48
Formel 18 Maßstab..... 48
Formel 19 Abstand zum Rand..... 49
Formel 20 Koordinaten für die Zeichnung..... 49
Formel 21 Definition des Kreuzprodukts..... 50
Formel 22 Flächenformel nach Gauß-Elling..... 50
Formel 23 Gesamtfläche 50
Formel 24 Abstand zweier Punkte 51
Formel 25 Umfang oder Länge 51
Formel 26 $f_{L,abs}$ absoluter Längenfehler 51
Formel 27 $f_{L,prz}$ relativer Längenfehler 51
Formel 28 Differenz des berechneten und gemessenen Spannmaßes..... 52
Formel 29 Fehlerprozent beim Polarverfahren 52
Formel 30 Mittlerer Fehler Polarverfahren 52
Formel 31 Mittlerer Fehler mehrfach angeschlossener Polygonzug..... 52
Formel 32 $f_{F,V}$ Flächenfehler, „Verbesserung“..... 53
Formel 33 Entspricht Formel 5 53

Formel 34 Abweichung von d vom Erwartungswert 0 54
Formel 35 geschätzte Messunsicherheiten, polar 54
Formel 36 geschätzte Messunsicherheiten, kartesisch 54
Formel 37 Gaußsche Fehlerfortpflanzung 54
Formel 38 Flächenberechnung im Aequometer 55
Formel 39 Ableitungen der Flächenberechnung 55
Formel 40 Unsicherheit der Fläche nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 55

7.5. Übersicht der Notationen

Hinweis: In der Spalte „Ort“ sind die Spalten- bzw. Zeilenbenennungen zu finden, unter denen die beschriebenen Werte im Aequometer v. 3.4 berechnet werden. Soweit nicht anders angegeben, befinden sich diese stets im Tabellenblatt „Polygon“.

Bezeichnung	**Formelzeichen**	**Einheit**	**Ort**	**Abschnitt**
Eingangsdaten				
Richtung	φ	Grad oder Gon	C	2.10.1
Strecke (Schrägdistanz)	r	m	D	2.10.1
Neigung	ϑ	Grad, Gon oder Neigungsprozent	E	2.10.1
Variablen				
Gesamtzahl aller Vektoren	A	$A \in \mathbb{N} : 3 < A < 100$	-	2.10.2
Aktuell berechneter Vektor	i	$i \in \mathbb{N} : 0 < i \leq A$	-	2.10.2
Konstanten				
Winkelmaß Hz	W_{Hz}	Umrechnung Grad oder Gon in Rad	P33	2.10.2
Winkelmaß Vt	W_{Vt}	Umrechnung Grad, Gon oder Neigungsprozent in Rad	P35	2.10.2
Neigung a oder z	N_{avz}	$N_{avz} \in \mathbb{N} : \{-100, -90, 0\}$	P37	2.10.2

Bezeichnung	**Formelzeichen**	**Einheit**	**Ort**	**Abschnitt**
Berechnete Werte				
Horizontaldistanz (Hdi)	r_{Hz}	m	F	2.10.3
orthogonale Koordinatenunterschiede	$\vec{P}_i = \begin{pmatrix} d_{Y,i} \\ d_{X,i} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \text{m} \\ \text{m} \end{pmatrix}$	G,H	2.10.4
Rechtswert Hochwert Endgültige Koordinaten	$\vec{P}_i' = \begin{pmatrix} d'_{Y,i} \\ d'_{X,i} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \text{m} \\ \text{m} \end{pmatrix}$	K,L	2.10.6
Schlussvektor des offenes Polygons	$\vec{P}_A = \begin{pmatrix} d_{Y,A} \\ d_{X,A} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \text{m} \\ \text{m} \end{pmatrix}$	Q127: Q131	2.10.7
Fläche der Teilparallelo-gramme	F_i	m²	M	2.10.9
Fläche des geschlossenen Polygons	F (F_{PGG})	m²	P53	2.10.9
Fläche des offenes Poly-gons	F_{PGO}	m²	AC34	2.10.9
Abstand der Punkte P'_{i-1} und P'_i	U_i	m	R	2.10.10
Umfang des Polygons	U	km	B12	2.10.10
streckenproportionale Fehlerverteilung				
X und Y Komponente des Abschlussfehlers	E_Y E_X	m	-	2.10.5
Gesamtstrecke des Ab-schnitts beim mehrfach angeschlossenen Polygonzug	G	m	AG AH	2.10.5
Teilfehlerkorrektur pro Vektor	$\Delta Y_i, \Delta X_i$	m, m | geschlossenes P.: mehrfach angeschl. P.:	I, J AM,AN	2.10.5

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Ort	Abschnitt
Berechnen der Zeichnung				
Maximale Erstreckung	W_{max}	cm	P41	2.10.8
Seitenlänge der Zeichnungsfläche	d_Z	cm	10 cm	2.10.8
Maßstab	C	-	P43	2.10.8
Abstand zum Rand	m_X m_Y	cm cm	P50 P51	2.10.8
Koordinaten der Zeichnung	$\tilde{\vec{P}}_i = \begin{pmatrix} \tilde{d}_{X,i} \\ \tilde{d}_{Y,i} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \text{cm} \\ \text{cm} \end{pmatrix}$	O N	2.10.8
Längenfehler				
Realer Längenfehler, wenn Referenzkoordinaten bekannt	$f_{L,real}$	m	-	
Abschlussfehler, absoluter Längenfehler geschlossenes Polygon	$f_{L,abs}$	m	B21	2.10.11
relativer Längenfehler geschlossenes Polygon	$f_{L,prz}$	%	C21	2.10.11
Spannmaß, Abweichung Polarverfahren	$S_i, \Delta S_i$	m	„Polar“ G,H,I	2.10.11
Fehlerprozent Polarverfahren	$f_{PGZ,i}$	%	„Polar“ J	2.10.11
Mittlerer Fehler Polarverfahren	f_{PGZ}	%	„Polar“ J4	2.10.11
Mittlerer Fehler mehrfach angeschlossener Polygonzug	f_{LXE}	%	AO44	2.10.11
Flächenfehler				
Realer Flächenfehler, wenn Referenzfläche bekannt	$f_{F,real}$	m²	-	
„Verbesserung“	$f_{F,V}$	m²	B32	2.10.12
„Schätzer“	$f_{F,S}$	m²	AV: AY	2.10.12
„Gaußsche Fehlerfortpflanzung“	$f_{F,G}$	m²	BQ35	2.10.12

Abstract

Loose, Johannes

Untersuchung polarer Aufnahmeverfahren in der forstlichen Vermessung und Entwicklung einer praxistauglichen Software zur Auswertung der Daten mit Übernahme in GIS-Systeme

Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, Fakultät Wald und Forstwirtschaft,
April 2008, 116 Seiten

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der polaren Aufnahme in der forstlichen Vermessung, die mit einfachen Geräten, wie Kompass und Bandmaß, durchgeführt werden kann. Zunächst werden die wichtigsten Messgeräte vorgestellt. Dabei wird auf ihre Genauigkeit und Anwendung eingegangen und mögliche Fehlerquellen werden aufgeführt. Es werden Aufnahmetechniken sowie verschiedene Verfahren der Aufnahme und deren Einsatzmöglichkeiten behandelt. Mit dem Fokus auf die Vermessung förderfähiger Kulturflächen in Bayern wurde eine Software zur Auswertung polarer Aufnahmen entwickelt, der Aequometer, dessen wichtigste Funktionen und Berechnungsmethoden dargelegt werden. Für den praktischen Teil wurden Messungen im Kranzberger Forst und in Hohenschäftlarn durchgeführt. Die Lagetreue der erfassten Punkte liegt unter drei Metern und die Flächentreue im Mittel unter einem Prozent, was sich als vergleichbar mit den besten, 2005 von Markus Hoffmann getesteten GPS-Geräten erweist. Der Zeitaufwand bestimmt sich rechnerisch zu sechs Minuten für die Aufnahme eines Punktes, einschließlich Rüstzeit und Auswertung. Aus 168 Messungen mehrerer Revierleiter wird ermittelt, dass vorwiegend Flächen kleiner als ein Hektar vermessen werden wobei sich im Mittel ein Abschlussfehler von weniger als einem Prozent ergibt. Eine Untersuchung der im Aequometer verwendeten Verfahren zur Fehlerermittlung wird mit simulierten Daten durchgeführt, die in unter Betracht dieser Ergebnisse erzeugt wurden. So kann bestätigt werden, dass die streckenproportionale Verteilung des Gesamtfehlers beim Aufnahmeverfahren geschlossenes Polygon sich günstig auswirkt auf die Flächentreue und die Lagetreue der Messpunkte. Trotz verschiedener Berechnungsmethoden konnte jedoch in der Simulation, bei symmetrisch verteilten Messunsicherheiten, kein direkter Zusammenhang zwischen dem im Aequometer Berechneten und dem realen Fehler nachgewiesen werden. Einzelne, grobe Fehler werden hingegen sicher erkannt.