

Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen GIS-Datenerfassung mit polaren Freihandmesssystemen

Boris Resnik

1 Einführung

Geo-Informationssysteme (GIS) haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung in allen Tätigkeitsbereichen gewonnen, in denen mit Karten und anderen raumbezogenen Daten gearbeitet wird. Wesentlicher Bestandteil aller Geo-Informationssysteme sind digitale Daten. Bei der Erfassung dieser Daten wird in der Regel der Raumbezug der einzelnen Objekte in Koordinatenform erfasst, wofür alle bekannten Vermessungsmethoden als direkte Datenlieferanten dienen können. Für eine wirtschaftliche Arbeitsweise sollten jedoch solche Lösungen eingesetzt werden, bei denen ein durchgängiger digitaler Datenfluss möglich ist. In der Aufbauphase der GIS erfolgt die Datenerfassung in der Regel auf der Basis der Digitalisierung von analogen Kartenbeständen. Ergänzend dazu werden zunehmend Methoden der Luft- und Satellitenbildauswertung eingesetzt. Eine vollständige Kartierungslösung kann ebenfalls durch die Integration der verschiedenen Sensoren auf einer gemeinsamen, zeitlich synchronisierten Plattform (sog. fahrzeuggestützte Mappingsysteme) realisiert werden. Mit derartigen autonomen Systemen sind alle Objekte (Gebäude, Bäume, Beschilderungen etc.) in einem Korridor seitwärts gefahrener Wegstrecken (Straße, Bahnlinie, Fluss etc.) bestimmbar [1]. Ab einem bestimmten Zeitpunkt ist jeder Anwender gezwungen, seinen Datenbestand im Feld zu aktualisieren und fortzuführen, wobei die „selektive“ Felderfassung der morphologisch oder thematisch ausgewählten Einzelobjekte (Punkte, Linien, Flächen) an Bedeutung gewinnt. Solche Datenerfassung ist typisch für eine konventionelle Vermessung und entspricht z.B. der Auswahl bedeutsamer Einzelpunkte bei der tachymetrischen Aufnahme.

Die Genauigkeitsanforderungen bei einer Felddatenerfassung ergeben sich im wesentlichen aus dem Zielmaßstab, für den die Daten erhoben werden, wobei der Begriff Maßstab ausschließlich im Bezug auf die Generalisierungsstufe der Objekte zu verstehen ist. Bei der Felderfassung im mittleren Maßstabsbereich (ab 1 : 10 000) müssen Positionierungsgenauigkeiten ab ± 1 m gewährleistet werden. Während im konventionellen Vermessungsbereich die exakte Lagebestimmung im Gelände seit jeher Gegenstand ist, bedient sich die Feld-GIS-Datenerfassung in diesen Maßstäben bisher oftmals noch sehr einfacher Methoden. Um die Datenerfassung zu beschleunigen und wirtschaftlich zu gestalten, kommen in der Regel primitivste Methoden wie Abschreiten oder sogar Abschätzen nach Augenmaß zur Anwendung. Selbstverständlich ist dabei ein digitaler Datenfluss nicht gegeben und die Qualität der so gewonnenen Informationen lässt zu wünschen übrig. Gerade Vermessungsingenieure äußern besonders oft gewisse fachliche Vorbehalte oder geometrische Bedenken gegen solche Praktiken [siehe z.B. 9]. Da die Geodaten auch im mittleren Maßstabsbereich für die Dienstleistungsunternehmen und speziell für private Vermessungsbüros [8] in den letzten Jahren zum wertvollen und gewinnbringenden Rohstoff geworden sind, wird zur Zeit verstärkt nach einem vernünftigen Kompromiss zwischen Machbarem und Sinnvollem durch den Einsatz neuartiger Hilfsmittel bei der Felddatenerfassung gesucht.

2 Freihandmesssysteme und ihre Komponenten

Das GPS-Verfahren bietet heutzutage in verschiedenen Bereichen des Vermessungswesens wirtschaftliche und leistungstechnische Vorteile gegenüber anderen Messanordnungen und kann auch zur kostendämpfenden und gleichzeitig geometrisch korrekten GIS-Felddatenerfassung im mittleren Maßstabbereich beitragen. Mit der Entwicklung und Verbreitung der GIS-Anwendungen werden für diese Zwecke von verschiedenen Herstellern (Breithaupt, GEOSat, Leica, Sokkia, Trimble usw.) zunehmend spezielle Erfassungssysteme auf Basis der Handheld-GPS-Empfänger angeboten [6]. Die Erfahrungen in verschiedenen Anwendungsbereichen zeigen allerdings, dass die satellitengestützten Verfahren keine allumfassende Problemlösung für eine solch komplexe Aufgabe wie die GIS-Datenerfassung darstellen können. Vielmehr scheint erst die gezielte Kombination der verschiedenen Verfahren bzw. Sensoren eine effektive und somit kostengünstige Feldarbeit zu ermöglichen. Neben den GPS-Empfängern treten deswegen insbesondere die polaren Handsysteme vermehrt in Erscheinung, die den Ausgleich von gewissen Nachteilen des GPS-Verfahrens bei größeren Abschattungen bzw. der Einmessung unzugänglicher Punkte ermöglichen. Bei einer Kombination der Verfahren ergibt sich die Möglichkeit, die schnelle GPS-Referenzierung in einem übergeordneten Koordinatensystem mit den Vorteilen des „klassischen“ Messtisches im Rahmen eines geschlossenen Datenflusses zu verbinden.

Mit polaren Freihandsystemen können die Objektkoordinaten ähnlich wie bei der Tachymetrie durch Messung der horizontalen Richtung, des Zenitwinkels und der Raumstrecke von einem bereits koordinierten Standpunkt aus nach dem Polarverfahren ermittelt werden. Spezielle auf den Nahbereich abgestimmte Systeme aus Laserentfernungsmesser, elektronischen Kompass und Neigungssensor werden seit einigen Jahren von Firmen wie Breithaupt (Mapstar-Ladis), Jenoptik (LEM 300-GEO), Leica (Vector-GIS), MDL (LaserAce 300) usw. angeboten [4]. Die Handheld-Laserentfernungsmesser bieten die Möglichkeit, Entfernungen bis zu 500 m direkt mit einer hohen Genauigkeit im Zentimeterbereich zu bestimmen. Sie sind bereits seit einigen Jahren auch als eigenständige Geräte erfolgreich im Einsatz. Der Laserdistanzmesser wird im Sinne des Polarverfahrens durch einen integrierten elektronischen Kompass ergänzt, mit dem die nach magnetisch Nord orientierten horizontalen Winkel ermittelt werden können. Der in Polarsystem integrierte Neigungssensor liefert die Abweichung der Zielachse von der Horizontalen (bezogen auf die Richtung zum Zielpunkt) und übergibt diese Werte dem Prozessor zur Berechnung der Höhenunterschiede bzw. horizontalen Entfernungen. Alle genannten Sensoren verfügen über eine serielle Schnittstelle und können somit direkt miteinander bzw. mit einem Datenlogger oder PC kommunizieren.

Für die Planung sowie für Umweltanalysen spielte die Visualisierung der GIS-Information schon immer eine besondere Rolle. Durch die Anwendung von digitalen CCD-Kameras im Rahmen von Freihandsystemen kann die geometrisch korrekte GIS-Visualisierung der Objekte bzw. Nachmessung, auch noch Jahre später, erheblich vereinfacht werden. Der Einsatzschwerpunkt der Nahbereichsphotogrammetrie liegt bekanntlich zwischen Objektgrößen von etwa 1m bei Genauigkeiten bis unter 0,1mm (Industrieanwendungen) und Objektgrößen von ca. 200 m bei Genauigkeiten im cm-Bereich (Architekturanwendungen) [3]. Da sich bei der GIS-Datenerfassung im mittleren Maßstabbereich im Unterschied zu diesen Anwendungen vergleichsweise niedrige Anforderungen an die Genauigkeit ergeben, kann die direkte Bestimmung der Orientierungsparameter durch GPS- und polare Sensoren sehr effizient verwendet werden [4]. Die Möglichkeit der online-Auswertung im Feld zählt ebenfalls zu den Vorteilen solcher Kombinationen.

Bei der GIS-Fortführung ist die Entscheidung vor Ort nur dann möglich, wenn der komplette Datenbestand dem Anwender im Feld zur Verfügung steht. Dies kann nur durch Kopplung der Multisensorsysteme mit feldtauglichen robusten Computern und spezieller Feldsoftware geschehen. Mit solchen Systemen können georeferenzierte Sachdaten erhoben und gleichzeitig die unterschiedlichen Sensoren gesteuert werden. Auch die unmittelbare GIS-Integration kann nach Bedarf direkt im Feld vorgenommen werden. Eine erhöhte Wirtschaftlichkeit ergibt sich dabei aus einer effizienteren Feldarbeit und geringerem Nachbearbeitungsaufwand im Büro.

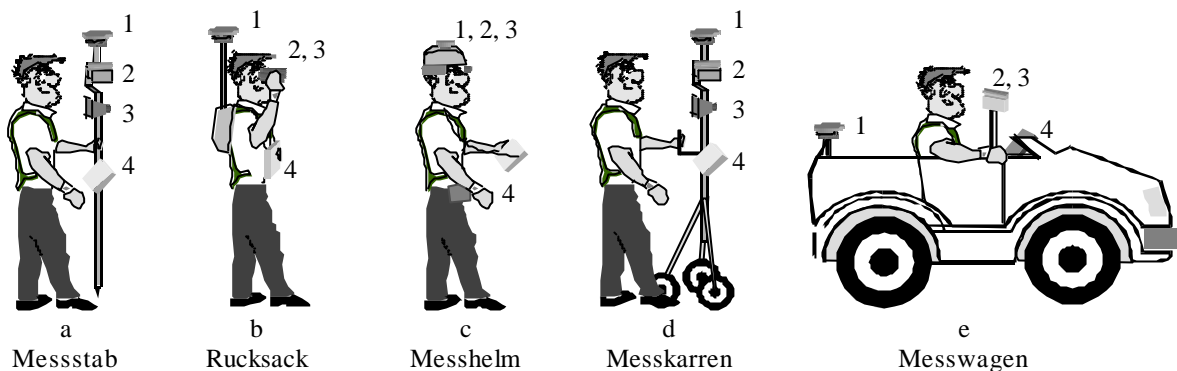


Abbildung 1: Multisensorsysteme für die GIS-Datenerfassung

(1 – GPS-Antenne, 2 – Polarsystem, 3 – Digitalkamera, 4 – Feldcomputer)

Die modernen Handheld-Empfänger, Handheld-Totalstationen bzw. Digitalkameras sind sehr kompakt gebaut und können auf verschiedene Weise in Rahmen von Freihandsystemen kombiniert werden. Die konventionelle geodätische Lösung für die GPS-Antenne ist z. B. der Vermessungsstab, an dem auch andere Sensoren und Feldcomputer übereinander montiert werden können (Abbildung 1 a). Da bei der GIS-Datenerfassung in mittleren Maßstäben Genauigkeiten in Meter-Bereich angestrebt werden, entfällt in der Regel die genaue Zentrierung der GPS-Antenne. Weil bei der Datenerfassung im Gelände der Anwender außerdem oftmals auf beide Hände zur sicheren Fortbewegung angewiesen ist, bevorzugen die Hersteller von speziellen GPS-Empfängern die Rucksacklösung. Das Polarsystem kann in diesem Fall als Handgerät bedient werden (Abbildung 1 b). Die eingesetzten Feldcomputer erlauben jedoch diese Arbeitsweise nur bedingt, da sie bei solchen Messungen beiseite gelegt werden müssen und die Online-Steuerung der Messprozesse verloren geht. Wegen fortschreitender Miniaturisierung der Sensoren kann das polare System auch in einen Helm integriert werden, den der Benutzer während der Messungen auf dem Kopf trägt (Abbildung 1 c). Von einzelnen Dienstleistungsunternehmen wurden bereits fahrzeuggebundene Messsysteme (Pkw bzw. Messkarren) realisiert, mit denen die schnellere Datenerfassung vor allem von Straßen bzw. Wegen aus möglich ist (Abbildung 1 d,e).

3 Winkelmessung mit Magnetsensoren

Kernstück der polaren Handmesssysteme bilden elektronische Magnetsensoren, bei denen die magnetische Richtkraft der Erde für die Winkelmessung ausgenutzt wird. Der Theorie des Erdmagnetismus entsprechend liegt die Hauptursache des Erdmagnetismus im Erdinnern [5]. Bei den Winkelmessungen mit einer konventionellen Bussole stellt sich die Magnetnadel des Kompasses automatisch in die Richtung „Magnetisch Nord“ ein. Die magnetischen Richtungswinkel (Azimute) A zu den aufzunehmenden Punkten können dabei direkt mit einem passenden Teilkreis ermittelt werden (Abbildung 2). Da die Dipolachse um ca. $11,5^\circ$ gegen die Rotationsachse der Erde geneigt ist, müssen die gemessenen Winkel durch Korrekturwerte mit dem geodätischen Gitternetz in Übereinstimmung gebracht werden. In der Regel wird die sog. Nadelabweichung gegen die Gitterlinie (Abweichung der Magnetnadel von der x -Achse des Koordinatensystems) berücksichtigt. Da das magnetische Feld in der Regel sehr inhomogen ist, sind die bekannten Werte der Nadelabweichung nicht ohne weiteres auf verschiedene Gebiete übertragbar. Bei praktischen vermessungstechnischen Arbeiten wird deswegen der Reduktionswert n für jedes Messgebiet aus den Unterschieden der Streichwinkel A und der entsprechenden Richtungswinkel t zweier bzw. mehrerer koordinierter Punkte ermittelt:

$$n = t - A \quad . \quad (1)$$

Der so ermittelte Reduktionswert ist von den örtlichen bzw. zeitlichen Schwankungen des Feldes sowie von den Instrumentenfehlern abhängig.

Die Winkelmessungen mit konventionellen Bussolen sind im Vermessungswesen seit Jahrhunderten als Bussolentachymetrie bekannt. In der Vergangenheit wurde das Verfahren jedoch im Vermessungswesen als ungenau und nicht zuverlässig betrachtet. Hauptgrund dafür ist, dass sowohl örtliche Störmassen (Gesteine, Eisen usw.) als auch in der Nähe des Standpunktes befindliche eiserne Zäune, Gleise, Eisenbetonbauten, Gleichstromleitungen usw. die Magnetnadel erheblich beeinflussen. Um den Ablenkungsfehler kleiner als 0,2 gon zu halten, sind z.B. nach [2] Hochspannungsmasten in 40 m, hohe Laternenmasten in 15 m, Gartenzäune in 10 m und eingleisige Eisenbahnlinien in mindestens 70 m zu umgehen. Diese Bedingungen können oftmals in bebauten Gebieten nicht erfüllt werden. Da die Bussolentachymetrie außerdem nicht den Anforderungen eines digitalen Datenflusses angepasst werden konnte, geriet das Verfahren in den letzten Jahrzehnten in Vergessenheit. Die Entwicklung der elektronischen magnetischen Aufnehmer bildet jedoch die technologische Basis für die weitere Entwicklung des Konzeptes, das zunehmend bei verschiedenen Navigations- und Vermessungsaufgaben mit vergleichsweise niedrigen Anforderungen an die Genauigkeit eingesetzt wird. Die GIS-Datenerfassung im mittleren Maßstabbereich mit polaren Handmesssystemen ist nur ein Beispiel dafür.

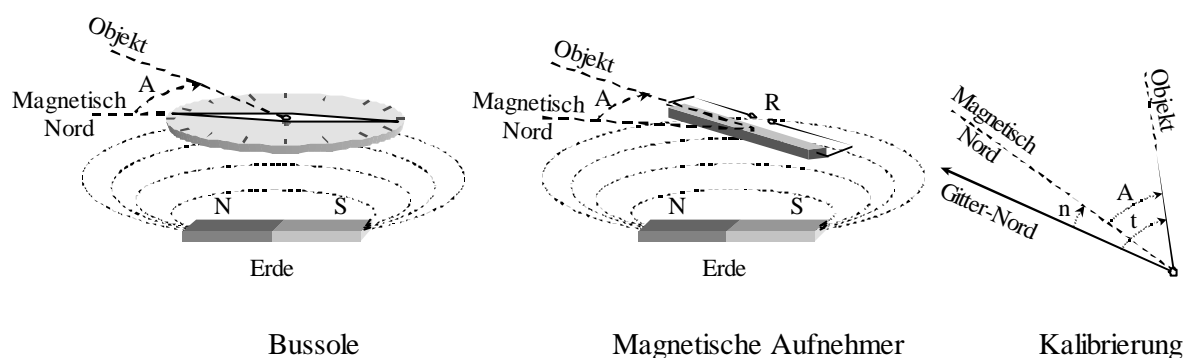


Abbildung 2: Verwendung der Magnetsensoren für geodätische Winkelmessungen

Bei den elektronischen magnetischen Aufnehmern wird in der Regel die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes R in Längsrichtung eines Halbleiterstreifens (Abbildung 2) von der Größe der magnetischen Induktion (Gaußeffekt) ausgenutzt [7]. Der elektrische Widerstand R solcher MDR-Sensoren (Magnetic field Depending Resistor) nimmt etwa quadratisch mit der magnetischen Induktion zu. Die Änderung des Widerstandes bei der Drehung des Sensors im magnetischen Erdfeld beträgt dabei ca. 1-2% und kann als Funktion des Rotationswinkels A dargestellt werden. Die Nord-Richtung des magnetischen Feldes lässt sich am einfachsten aus der Differenz der gemessenen Widerstände von zwei um einen festen Winkel orientierten Sensoren ableiten.

Die Ablesegenauigkeit der Winkelmessungen mit den modernen elektronischen Magnetsensoren beträgt ca. 0,1 gon. Durch Ablesung von Bruchteilen des Winkels wird jedoch eine falsche Sicherheit vorgetäuscht, weil diese Sensoren genauso wie die konventionellen Kompass für Störungen anfällig sind. Bei allen mit elektronischen Sensoren eingeführten Neuerungen wird der Einfluss dieser Störungen auf die Zuverlässigkeit der Winkelmessungen nicht reduziert sondern verstärkt. Es ist z. B. bekannt, dass am Kompass bzw. bei den unmittelbar am Instrument stehenden Personen keine Eisenteile vorhanden sein dürfen, da sie eine Ablenkung der Magnetnadel bewirken. Bei der Arbeit mit asymmetrisch zu einander angeordneten elektronischen Geräten und besonders bei Messungen von einem Fahrzeug aus (siehe Abbildung 1) sind diese Bedingungen kaum zu erfüllen. Da in der Umgebung des Multisensorsystems folglich ein eigenes Magnetfeld herrscht, muss neben der Nadelabweichung n der geräteabhängige Wert Δn berücksichtigt werden:

$$t = A + n + \Delta n . \quad (2)$$

Der Wert Δn ist von der relativen Lage aller Bestandteile des Multisensorsystems abhängig. Um die von den elektronischen Sensoren „mitgebrachte“ Ablesegenauigkeit voll ausschöpfen zu können, muss deswegen die Kalibrierung des Systems in der gleichen Konstellation durchgeführt werden, die später bei den Messungen geplant ist. So muss z. B. bei Messungen von einem Fahrzeug bzw. von einem Karren die Kalibrierung ebenfalls von diesen durchgeführt werden.

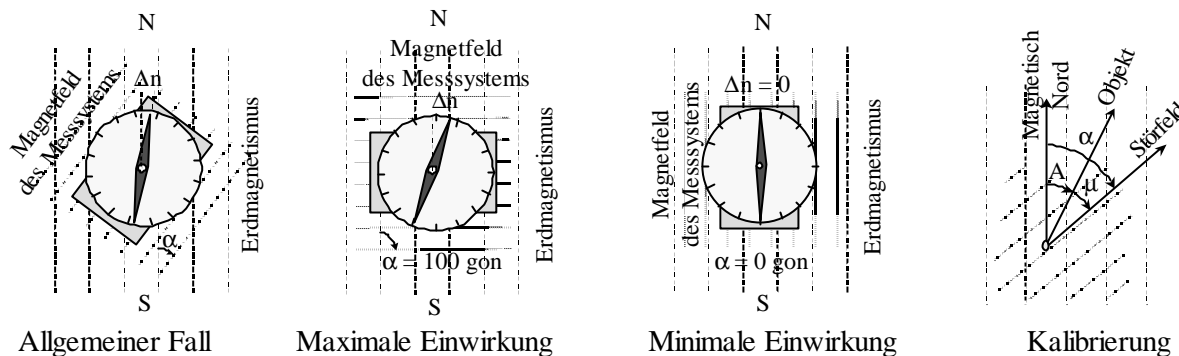


Abbildung 3: Wirkung des eigenen magnetischen Feldes des Messsystems auf Winkelmessungen

Bei Winkelmessungen muss außerdem die Tatsache berücksichtigt werden, dass bei der Drehung des Systems im Magnetfeld der Erde (Winkel α) zyklische Änderungen des Wertes Δn stattfinden (Abbildung 3). Am stärksten ist der Einfluss des Störfeldes auf Winkelmessungen, wenn seine Feldlinien um 100 gon bzw. 300 gon gegen Nordrichtung orientiert sind. Das eigene magnetische Feld des Systems hat dann keinen Einfluss auf das Verhalten der Magnetnadel (bzw. Nordrichtung des elektronischen Sensoren), wenn die Richtung von den Feldlinien des Störfeldes und des Erdmagnetismus zusammenfallen. Die mathematische Abhängigkeit des Wertes Δn vom Orientierungswinkel α kann durch Vergleich der geodätischen Richtungswinkel t mit den magnetischen Streichwinkeln A zu mehreren kreisförmig verteilten Festpunkten ermittelt werden. Wenn die Orientierung des Störfeldes gegen die Zielachse des Polarsystems (Winkel μ in Abbildung 3) bei den Messungen konstant bleibt, erhält man dabei die Gleichung

$$t = A + n + k \cdot \sin(A + \mu) \quad (3)$$

wobei k die empirische Konstante ist. Für mehrere gemessene Richtungen erhält man ein lösbares nicht lineares Gleichungssystem mit drei Unbekannten (n , k und μ).

In verschiedenen Tests wurde bereits nachgewiesen, dass bei Messungen mit polaren Freihandsystemen die korrekte Kalibrierung der Magnetsensoren an Bedeutung gewinnt. Das Kalibrierungsmodell (3) beschreibt die komplizierten Zusammenhänge zwischen verschiedenen Störfeldern nicht vollständig, kann jedoch von Nutzen sein, um die groben Fehler bei den Messungen zu vermeiden.

4 Genauigkeitstests für polare Handmesssysteme

Beobachtungen gewinnen ihre vollständige Aussagekraft erst dann, wenn bekannt ist, mit welchen realen Abweichungen dabei zu rechnen ist. Eine solche Information ist immer statistischer Natur, d.h. die Georeferenzierung der GIS-Objekte kann nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mit der Realität übereinstimmen. Das Genauigkeitspotential, über das die kommerziell verfügbaren polaren Handmesssysteme heute bereits verfügen, wurde in den letzten Jahren von uns anhand von umfangreichen Testfeldmessungen und entsprechenden statistischen Auswertungen geprüft.

Bei den ersten Untersuchungen handelt es sich um fünf Testfelder (Abbildung 4) geringer Ausdehnung (50 – 100 m) mit je fünf markierten Punkten, deren Referenzkoordinaten durch elektronische Tachymetrie im lokalen Lage- bzw. Höhensystem mit hoher Genauigkeit im Millimeterbereich ermittelt wurden. Die Stative auf den Kontrollpunkten wurden nacheinander mit dem polaren Messsystem

Mapstar-Ladis der Firma Breithaupt besetzt, mit dem man alle Zieltafeln mehrfach eingemessen hat. Um den Einfluss von Zentrierung, Horizontierung usw. zu vermeiden, wurden die Handmesssysteme und die Zieltafel mittels mechanischer Einrichtungen unter Beibehaltung der einmal vorgenommenen Einstellungen untereinander ausgetauscht. Abschließend wurden die aus den Messungen abgeleiteten Entfernungen, Höhenunterschiede, Azimutwerte sowie Richtungen zu den Zielpunkten mit den Referenzwerten verglichen.

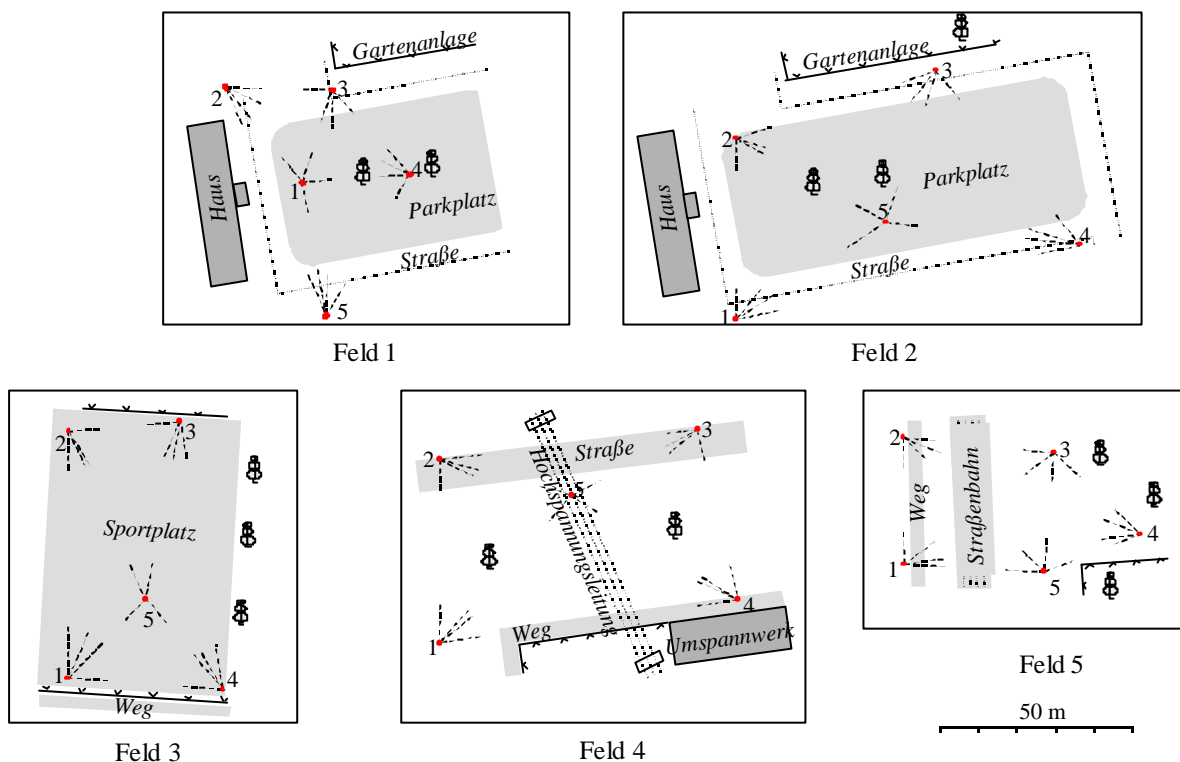


Abbildung 4: Testfelder für Messungen mit Zwangszentrierung

Vor den statistischen Auswertungen wurden alle systematischen Abweichungen im Sinne einer Kalibrierung durch das Anbringen der Additionskonstanten behoben. Die Nadelabweichung des Magnetensors musste im Unterschied zu den anderen Reduktionswerten für jedes Messfeld neu ermittelt werden, da bei den Untersuchungen gezielt weit entfernte Gebiete mit z. T. starken magnetischen Störungen ausgewählt wurden. Die in der Tabelle 1 aufgelisteten Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzungen (empirische Standardabweichungen) gehen davon aus, dass die verbliebenen Abweichungen einer „Normalverteilung“ unterliegen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Testmessungen mit Zwangszentrierung

Feld		Mittlere Entfernung m	Empirische Standardabweichungen			
			Entfernung s_D m	Höhe s_H m	Azimut s_A gon	Richtung s_R gon
1	Parkplatz	39	0,013	0,018	0,6	0,3
2	Parkplatz	63	0,014	0,036	0,9	0,2
3	Sportplatz	47	0,010	0,018	0,5	0,1
4	Stromleitungen	59	0,009	0,023	0,5	0,3
5	Straßenbahn	39	0,007	0,013	1,9	0,5

Aus der Auswertung aller Ergebnisse wurde ersichtlich, dass sich die Standardabweichungen der Entfernungs- und Höhenmessungen in der überwiegenden Mehrzahl im cm-Bereich bewegten, wobei sich

die Ergebnisse für alle Testfelder sehr ähneln. Aus allen vorhandenen Messungen wurden die empirischen Standardabweichungen der Streckenmessungen $s_D = 12$ mm und der Höhenmessungen $s_H = 20$ mm festgestellt. Da ein Anteil von Fehlereinflüssen (insbesondere bei den Höhenmessungen) distanzabhängig ist, weisen die festgestellten Abweichungen von den Soll-Werten eine Abhängigkeit von den gemessenen Entfernungen D auf. Im untersuchten Messintervall zwischen 20 und 100 m können diese empirischen Zusammenhänge durch die nach der „Methode der kleinsten Quadrate“ ermittelten Regressionsgeraden

$$s_D(\text{mm}) = 9 + 0,05 \cdot D(\text{m})$$

$$s_H(\text{mm}) = 0,43 \cdot D(\text{m})$$

beschrieben werden.

Die Standardabweichungen der Azimutmessungen unterscheiden sich für verschiedene Messfelder erheblich und variieren zwischen 0,5 und 2 gon. Aus allen vorhandenen Messungen wurde die Standardabweichung von $s_A = 1,0$ gon ermittelt. Da die durch vielfältige Einflüsse auftretenden Azimutabweichungen zum Großteil in allen gemessenen Richtungen von einem Messpunkt gleichartig auftreten, werden sie durch Differenzbildung weitgehend eliminiert. Aus allen vorhandenen Messungen wurden die Standardabweichungen von $s_R = 0,3$ gon für die Richtungsmessungen ermittelt.

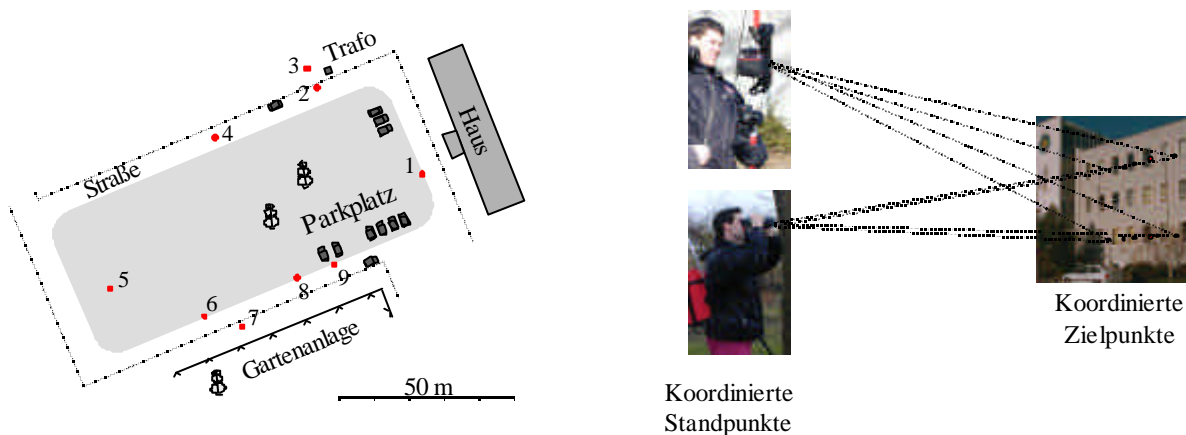


Abbildung 5: Testmessungen mit den Freihandsystemen

Bei den in der Tabelle 1 aufgelisteten Ergebnissen handelt es sich sicherlich um die höchste Genauigkeit, die mit den polaren Messsystemen zu erreichen ist. Um das Genauigkeitspotential der kommerziellen polaren Messsysteme bei der Anwendung „von Hand“ zu untersuchen, wurde ein weiteres Testfeld vorbereitet (Abbildung 5). Bei der Analyse dieser Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass das Testfeld auf einem grossen Parkplatz abgesteckt wurde und die in der Nähe der Standpunkte befindlichen Autos (besonders für den Punkt 9) und Stromanlagen (z. B. Trafo in der Nähe der Punkte 2 und 3) die Winkelmessungen erheblich beeinflussten.

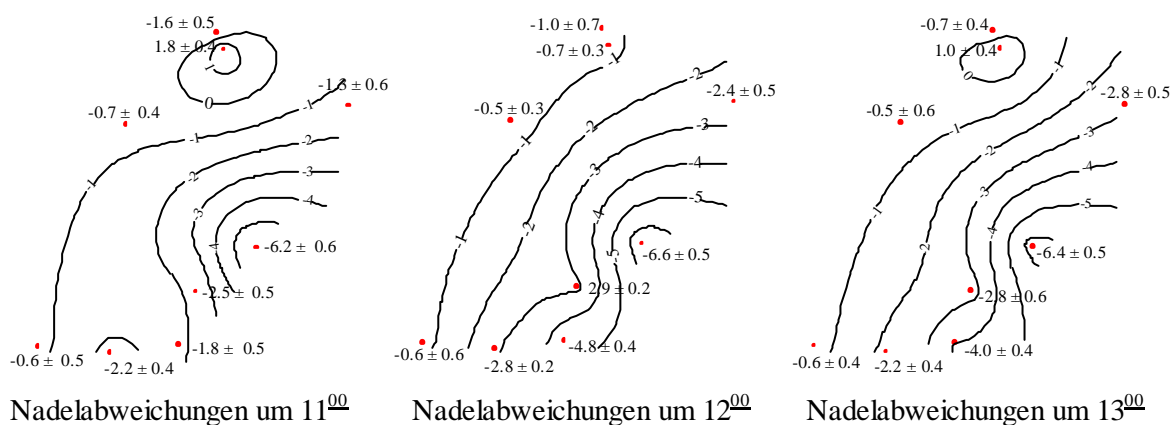
Bei den Testmessungen wurden die bereits mit hoher Genauigkeit koordinierten Zielpunkte an der Hauswand mehrfach von den ebenfalls koordinierten Standpunkten mit den Polarsystemen eingemessen. Für diese an verschiedenen Tagen und bei unterschiedlichen magnetischen Störfeldern durchgeführten Experimente standen zwei polare Messsysteme „Mapstar-Ladis“ der Firma Breithaupt und ein Gerät „Vektor“ der Fa. Leica zur Verfügung. Durch die standardmäßige Auswertung aller Messungen wurden die bereits erwähnten Standardabweichungen s_D , s_H , s_A und s_R berechnet, deren Übersicht die entsprechenden Spalten der Tabelle 2 wiedergeben. Als ein zweidimensionales Genauigkeitsmaß wird in der Tabelle der sog. mittlere Punktfehler $s_P = \sqrt{(s_x^2 + s_y^2)}$ angegeben, der aus den getrennt berechneten Standardabweichungen in den beiden Koordinatenrichtungen s_x und s_y abgeleitet wird.

Tabelle 2: Ergebnisse der Testmessungen mit den Freihandsystemen

Messreihe	Gerät	Empirische Standardabweichungen				
		Entfernung s_D m	Höhe s_H m	Azimut s_A gon	Richtung s_R gon	Position s_P m
1	Mapstar-Ladis	0,1	-	2,4	0,7	2,4
2	Mapstar-Ladis	0,1	-	2,2	1,0	2,3
3	Mapstar-Ladis	0,1	-	2,1	1,1	2,2
4	Mapstar-Ladis	0,2	-	2,1	1,2	2,2
5	Mapstar-Ladis	0,1	0,3	1,7	0,9	1,4
6	Vektor	0,1	0,1	1,7	0,8	2,0
7	Vektor	0,3	0,2	1,9	0,7	2,2
8	Mapstar-Ladis	0,1	0,2	1,8	0,8	1,7
9	Vektor	0,2	0,2	1,3	0,6	1,2

Wie erwartet wurde, blieb die Genauigkeit der Entfernung- und Höhenmessungen bei den Messungen „von Hand“ wegen der ungenauen Zentrierung und Zielidentifikation um den Faktor zehn unter den früher festgestellten Werten (Tabelle 1). Die relativ kleinen Genauigkeitsunterschiede zwischen den Azimutmessungen mit und ohne Stativ sind darauf zurückzuführen, dass Winkelmessungen fast ausschließlich von magnetischen Störfeldern an Messpunkten abhängig sind. Aus den durchgeführten Experimenten wurde ersichtlich, dass die festgestellten Genauigkeiten der Koordinatenberechnung (s_p) auch bei den Messungen „von Hand“ im wesentlichen nur von der Qualität der Winkelmessung abhängig sind.

Auch diese Messungen bestätigten unsere Befürchtungen, dass vor allem in bewohnten Gebieten die ermittelten magnetischen Azimute starken Schwankungen unterliegen. Die grundsätzlich aufgetretenen Probleme werden exemplarisch anhand von drei in einem zeitlichen Abstand von ca. einer Stunde durchgeführten Experimenten (Messreihen 2, 3 und 4 in der Tabelle 2) dargestellt. Da von jedem Standpunkt mindestens acht Kontrollpunkte eingemessen wurden, ist die getrennte statistische Auswertung für einzelnen Punkte möglich. Die berechneten Nadelabweichungen und ihre Standardabweichungen werden in Abbildung 6 graphisch aufgetragen. Zwischen den Nadelabweichungen der Punkte zu verschiedenen Zeitpunkten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Ein Vergleich der berechneten Nadelabweichungen innerhalb von einer Messreihe zeigt jedoch Unterschiede bis zu 6 - 7 gon, die weit außerhalb von Grenzwerten der Normalverteilung liegen. Diese systematischen Abweichungen können nur durch erhebliche magnetische Störungen von den o. g. geparkten Autos, Laternen bzw. Stromversorgungsanlagen hervorgerufen worden sein (siehe auch Abbildung 5).

**Abbildung 6.** Zeitliche und räumliche Variationen bei den Winkelmessungen

Die Messreihen 8 und 9 wurden parallel mit den Messsystemen Vektor (Fernglas) und Mapstar-Ladis (Messstab) durchgeführt. Dabei war die Möglichkeit gegeben, die Qualität der Messungen mit diesen Geräten direkt zu vergleichen. Zu den Vorteilen des Stabsystems Mapstar-Ladis gehört die bessere Zentrierbarkeit und die konstante Instrumentenhöhe. Das Messsystem Vektor erlaubt jedoch eine wesentlich bessere Zielidentifikation. Der Vergleich der Entfernungs- und Höhenmessungen lässt die Behauptung zu, dass sich diese Vorteile bei Messungen bis zu 100 m weitgehend kompensieren.

5 Zusammenfassende Bewertung

Die Entscheidung, welches Verfahren bei der GIS-Datenerfassung eingesetzt wird, hat sich bisher meist aus der Tatsache ergeben, ob ein GPS-, tachymetrisches oder photogrammetrisches Messsystem zur Verfügung steht. Mit der Verfügbarkeit hybrider Messsysteme bietet sich die Kombination dieser Verfahren förmlich an und das optimale Messinstrumentarium kann für jede anstehende Problemstellung frei gewählt werden. Der konsequente Einsatz von verschiedenen Technologien gestattet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. Die Georeferenzierung der Objekte entlang von Geh- bzw. Fahrrouten kann am einfachsten mit einem GPS-Empfänger durchgeführt werden, wobei in Ausnahmefällen auch die Anwendung eines Polarsystems im Sinne der freien Stationierung bzw. Polygonierung möglich ist. Die seitlich liegenden bzw. unzugänglichen GIS-Objekte werden in der Regel polar erfasst. Dabei ist der Einsatz von photogrammetrischen Verfahren sinnvoll, wenn große Datenmengen (Details) in kurzer Zeit erfasst werden müssen. Ziel einer Optimierung der GIS-Datenerfassung muss es sein, alle genannten Verfahren zu vereinfachen, zu beschleunigen und robust gegen grobe Fehler zu gestalten. Solch eine Optimierung ist nur dann möglich, wenn zuverlässige Informationen über die erreichbare Genauigkeit der einzelnen Verfahren vorliegen.

Die vorgestellten Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der kommerziellen polaren Messsysteme ließen ihre prinzipielle Eignung für die GIS-Datenerfassung im mittleren Maßstabbereich erkennen. Anhand von umfangreichen Testfeldmessungen wurde festgestellt, dass die Genauigkeit der Lagebestimmung im wesentlichen von der Qualität der Azimutmessungen abhängig ist, deren Standardabweichungen sich in der überwiegenden Mehrzahl im Bereich 0,5 – 2 gon bewegen. Je größer die gemessene Distanz D ist, desto stärker wirkt sich diese Ungenauigkeit auf die Koordinatenberechnung aus. Als ein zweidimensionales Genauigkeitsmaß für grobe Abschätzungen kann der mittlere Punktfehler

$$s_p = \left(\frac{s_A}{\rho}\right) \cdot D = 0,016 \cdot D$$

verwendet werden. Obwohl die Reichweite der kommerziellen polaren Messsysteme in der Regel mehrere hundert Meter beträgt, können sie lediglich bei Entfernungen bis zu 50 - 60 m die erforderliche Genauigkeit der Lagebestimmung von ± 1 m gewährleisten.

Die durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen beweisen eindeutig, dass die Azimutmessungen durch die systematischen Abweichungen bis zu 7 – 8 gon verfälscht werden können. Da bei der GIS-Datenerfassung mehrfache unabhängige Messungen von verschiedenen Standpunkten aus eher eine Ausnahme sind, können derartige Erscheinungen bei der Datenanalyse beträchtliche Probleme verursachen. Wenn im Messgebiet starke magnetische Störfelder herrschen, stößt damit der routinemäßige Einsatz der Magnetsensoren offensichtlich an seine Grenzen. Die Zuverlässigkeit der Georeferenzierung kann in solchen Fällen wesentlich verbessert werden, wenn anstatt der Azimute die Richtungen im Bezug auf einen bereits koordinierten Zielpunkt ermittelt werden. Solche „lowcost“ Winkelmesssysteme eignen sich wesentlich besser für die Belange der GIS-Datenerfassung als die wesentlich ungenaueren Azimutmessungen. Die verbleibenden Standardabweichungen der so gemessenen Richtungen sind in der Regel kleiner als 1 gon und sind entweder auf kurzfristige Störungen des magnetischen Feldes durch vorbeifahrenden Autos usw. oder auf mangelnde Anzielgenauigkeit ohne Fernrohr zurückzuführen. Den Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsvorteilen dieses Verfahrens stehen vor allem kostenrelevante Nachteile entgegen, da zusätzlich die Referenzpunkte im Gelände ausgewählt bzw. vorübergehend vermarktet werden müssen.

6 Literatur

- 1 Bill, R. (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann Verlag. Heidelberg.
- 2 Deumlich F. (1988): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. VEB Verlag für Bauwesen. Berlin.
- 3 Luhmann, T., (2000): Praxis der Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann Verlag. Heidelberg.
- 4 Resnik, B. (2000): Komplettlösung für die GIS-Datenerfassung mit Freihandmesssystemen, Interne Berichte des Institutes für Geodäsie und Geoinformatik, Heft 13. Universität Rostock. S. 55-69.
- 5 Resnik, B., Bill, R., (2000): Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- 6 Resnik, B., Hanke, S. (2000): Genauigkeit der mobilen GIS-Datenerfassung – ein GPS-Empfängervergleich. Vermessungswesen und Raumordnung. Heft 62/1. Bonn. S. 32-42.
- 7 Schlemmer, H. (1996): Grundlagen der Sensorik. Wichmann Verlag. Heidelberg.
- 8 Schwarzbach, F. (2000): Erfassung von Geodaten – Anforderung an den Geodäten. AVN. Heft 5. S. 168-171.
- 9 Wenderlein, W. (1998): Koordinaten sind überall. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten. 105. Jahrgang. S. 304-307.

Dank: Den Firmen F.W.Breithaupt & Sohn GmbH, Kassel und Leica sei für die Zurverfügungstellung der polaren Messsysteme „Mapstar-Ladis“ bzw. „Vektor“ gedankt.