

**Technische Universität München
Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement
Lehrstuhl für Geodäsie**

**Ein sensorgestütztes mobiles GIS
am Beispiel des Nationalparks „Bayerischer Wald“**

**Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.).
genehmigten Dissertation.**

Dipl.- Ing. Jens Czaja

**Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Schilcher
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. H. Schlemmer,
Technische Universität Darmstadt**

**Die Dissertation wurde am 18.01.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen am 26.04.2007 angenommen.**



Die Grundlage für diese Arbeit bildet das Teilprojekt 33-2 „Sensorgestütztes mobiles GIS“ des Verbundprojektes 33 „Forschung über Waldökosysteme“, das im Rahmen der High-Tech-Offensive Bayern der Bayerischen Staatsregierung durch die Regierung von Niederbayern gefördert wurde.

Zusammenfassung

Mobilität und ortsbezogene Information gewinnen als Faktoren für effizientere Arbeitsabläufe oder als neue Dienstleistungsprodukte in Form der ortsbezogenen Dienste immer mehr an Bedeutung. Die allgemeine Dynamik in der Kommunikations- und Informationstechnologie sowie die gestiegenen Anforderungen an Geodaten hinsichtlich Qualität und Quantität haben auch positive Auswirkungen auf die Entwicklung mobiler raumbezogener Erfassungs- und Informationssysteme, die in verschiedenen Varianten und zahlreichen Begriffsdefinitionen existieren. Je nach Anwendung werden hierzu verschiedene Positionssensoren, Messverfahren und Visualisierungstools miteinander kombiniert. Man unterscheidet dabei zwischen luft- und landgestützten Systemen, wobei letztere in der Regel als PKW- oder personenbezogenes System realisiert sind. Scheiterte in den vergangenen Jahren oft eine Realisierung effizienter (personenbezogener) Systeme an nicht geeigneten Hard- oder Softwarekomponenten, so stehen inzwischen einige feldtaugliche mobile Recheneinheiten sowie geeignete Kommunikationsmittel, Softwarepakete und Positionssensoren zur Verfügung. Vor allem der Kenntnis über eine ausreichend genaue und zuverlässige Position fällt in diesem Zusammenhang eine tragende Rolle zu, denn letztendlich ist sie die Grundvoraussetzung für die Nutzung der Vorteile einer „vor Ort Verarbeitung“ raumbezogener Informationen. An dem Beispiel eines *Sensorgestützten mobilen GIS (SmobGIS)* im Nationalpark Bayerischer Wald, das im Rahmen eines von der High-Tech-Offensive Bayern geförderten Forschungsprojektes realisiert wurde, wird die bis dahin konzeptionell aufgearbeitete Thematik anwendungsnah dargestellt sowie diverse praxisrelevante Fragestellungen im Zusammenhang mit dem alleinigen oder kombinierten Einsatz von GPS und handgetragenen 3D-Polarsensoren in forstlicher Umgebung erläutert.

Obwohl der Forst auf Grund der Signalunterbrechungen bzw. -störungen durch die Vegetation eine „GNSS-feindliche“ Umgebung darstellt, bietet der Einsatz moderner Satellitenpositionierungstechnologie eine ganze Reihe von Anwendungsmöglichkeiten für eine *absolute, dreidimensionale* Punktbestimmung. Dabei beeinflussen sich die Positionsqualität und Wirtschaftlichkeit gegenseitig und dürfen für eine praxisrelevante Bewertung nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt aber weniger auf finanziellen Kriterien, sondern vielmehr auf Aspekten der Praktikabilität und der erreichbaren Positionsqualität. Ziel ist es, einen Überblick über die relevanten Einflussfaktoren zu geben, sowie jene Größen und Verfahren näher zu betrachten, die im Zusammenhang von sensorgestützten mobilen GIS im Forst von Bedeutung sind. Hierbei steht neben dem Messkonzept und den erreichbaren Positionsgenauigkeiten beim erstmaligen Einsatz von GPS im Rahmen einer Waldinventur in Bayern vor allem der flexible, also herstellerunabhängige Einsatz von GPS-Sensoren auf Basis von Standarddatensätzen des NMEA-Protokolles im Fokus. Da bei der Bewertung von GPS-Positionslösungen auf Grund unterschiedlicher qualitätsrelevanter Informationen zwischen Ergebnissen aus dem *Beobachtungs-* oder *Positionsraum* differenziert werden muss und die bisher bei NMEA-Positionsraumdaten verwendeten Qualitätsparameter nur eine unzureichende Bewertung erlaubten, wurden im Rahmen dieser Arbeit neue, filterbasierte Auswertestrategien im Positionsraum anhand von diversen Beispielen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Verbesserungen durch visuelle Hilfen, wie z. B. spezielle Grafiken, möglich sind und Grenzen durch den Inhalt und die Qualität der vorliegenden NMEA-Daten gesetzt werden.

Das Ziel der zweiten SmobGIS-Positionierungskomponente ist die *terrestrische, relative* und *dreidimensionale* Punktbestimmung mit dem handgetragenen 3D-Polarsensor *LaserAce300*. Nach einer Beschreibung der relevanten Sensorkomponenten und Beobachtungsgrößen werden verschiedene genauigkeits- und zuverlässigkeitsrelevante Aspekte bei der Positionierung mit handgetragenen 3D-Polarsensoren diskutiert sowie die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, innovative Zentrierhilfe *OptoLot* vorgestellt. Die Ergebnisse der Testmessungen von wenigen dm bis mehreren Metern zeigen, dass in Gebieten mit keinen bzw. wenigen koordinativ bekannten Referenzpunkten zur Minimierung der Störeinflüsse eine zuverlässige und ausreichend genaue 3D-Positionierung mit Hilfe der konventionellen Messverfahren *Terrestrische Einzelpunktbestimmung* und *3D-Polarzug* nur schwer erreichbar ist. Daher wurde speziell für den Einsatz in forstlichen und alpinen Bereichen das *DGMMatch-Verfahren* entwickelt, das ein hochgenaues und hochauflösendes DGM als Referenzdatenbestand für die *3D-Positionierung des Standpunktes ohne die Verwendung von im Gelände vermarkten Festpunkten* nutzt. Testmessungen zeigen ein Genauigkeitspotential von $\leq 1\text{m}$, allerdings fehlt noch ein ausreichend signifikantes Kriterium für die zuverlässige Bewertung der mit diesem Verfahren generierten Positionsergebnisse.

Summary

Mobility and positional information are becoming ever more important in today's world, either as the basis of more efficient working procedures or in the form of new location based service products. Thus rapid developments in communications and information technology, combined with the demand for large quantities of high quality geo-data, have had a significant impact on the development of mobile GIS. These now exist in a variety of forms with numerous accompanying terminologies, because a wide range of position sensors, measurement techniques and visualisation tools can be combined appropriately for the desired application. In principle a differentiation is made between airborne- and land-based systems, where the latter are generally realised for in-vehicle or hand-held applications. Of greatest importance in such applications is an accurate and reliable knowledge of position, since this is a precondition for reaping the benefits of an 'on-site processing' of spatial information.

This thesis will present the various concepts of existing mobile spatial information systems and will particularly give a detail definition for mobile geo-information systems. Using the example of a sensor-aided mobile geographical information system (*SmobGIS*) in the Bavarian Forest National Park, developed within a research project funded by the Bavarian 'High-Tech-Offensive', the subject matter will be discussed from a practical point of view, with particular emphasis on questions relating to the separate or combined use of GPS and hand-held 3-D polar sensors in a forest environment.

Although forests represent a 'GNSS-hostile' environment, because of signal interruptions and disturbances caused by the vegetation, modern satellite positioning technology offers a wide range of options for absolute, three-dimensional position determination. In a practical analysis, accuracy and economics affect each other and cannot be treated in isolation. The emphasis in this study is however mainly placed on practicability and achievable positioning accuracy, rather than on financial criteria. The objective is to provide an overview of the major factors, quantities and methods which affect the use of sensor-aided mobile geographical information systems in a forest environment. In addition to addressing the measurement principles and the achievable system accuracy during the first application of GPS in a forest inventory in Bavaria, the focus is placed on the flexible (supplier-independent) use of GPS sensors by means of the NMEA protocol. Since it is important to differentiate between 'observational' and 'positional' space in the evaluation of GPS position information, and the quality parameters used to-date in NMEA position space data do not permit a sufficiently accurate appraisal, new filter-based evaluation strategies in position space were investigated.

The objective of the second *SmobGIS* positioning component is to determine the relative, terrestrial three dimensional point measurement using the hand-held 3-D polar sensor *LaserAce 300*. The relevant sensor components and observation quantities are first described, before addressing issues relating to accuracy and reliability when measuring position with a 3-D polar sensor, and then introducing the centring assistant *OptoLot*, which was developed during the course of this study. The results of test measurements from a few decimetres to several meters show that it is difficult to achieve reliable and sufficiently accurate 3-D positions using conventional measurement techniques in areas with few known reference points. Hence the *DTMMatch method* was developed specially for use in forested and mountainous areas. This relies on an extremely accurate high-resolution digital terrain model to provide reference data for 3-D positioning of a location without the use of fixed reference points in the landscape. Although a suitable criterion for evaluating the results generated by this method is yet to be developed, test measurements show a potential accuracy of better than one metre.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
1. Einführung.....	6
1.1. Grundgedanke eines sensorgestützten mobilen GIS	6
1.2. Anwendungsfälle und Vorteile mobiler Geodatenverarbeitung	7
1.3. Aufgabe und Bedeutung der sensorgestützten Positionierung	8
1.4. Zielsetzung und Übersicht	10
2. Mobile raumbezogene Informationssysteme	11
2.1. Grundlagen raumbezogener Informationssysteme.....	11
2.1.1. Begriffsbestimmung Geoinformationssystem	12
2.1.2. Modelle der Erdgestalt	14
2.1.3. Geodätisches Datum	15
2.1.4. Geodätische Bezugssysteme.....	15
2.1.5. Amtliches Koordinatensystem Bayern.....	17
2.1.6. Soldner Koordinatensystem.....	18
2.1.7. Höhensysteme in Bayern.....	18
2.2. Mobile Computing	19
2.3. Begriffe und Varianten mobiler raumbezogener Informationssysteme	20
2.3.1. Elektronische Feldbücher, digitaler Feldplan, CAF und mobile GIS	22
2.3.2. Mobile Mapping Systeme	23
2.3.3. Location Based Services	24
2.4. Anwendungsbereiche und Einsatzmöglichkeiten	26
3. Komponenten mobiler GIS	27
3.1. Mobile Recheneinheit.....	29
3.1.1. Kriterienkatalog	29
3.1.2. Mensch-Maschine-Interface.....	29
3.1.3. Produktvarianten mobiler Rechner	31
3.2. Zentrales Informationssystem und mobile Applikationssoftware	34
3.3. Mobile Datenkommunikation	36
3.4. Positionierungs- und Lokalisierungssysteme	39
3.4.1. Systemüberblick	39
3.4.2. Globale Navigation	40
3.4.2.1. Satellitenpositionierung.....	40
3.4.2.2. Terrestrische Systeme.....	44
3.4.2.3. Trägheitsnavigation.....	44
3.4.3. Regionale Netzwerke	45
3.4.3.1. Mobilfunkortung	45
3.4.3.2. Drahtlose Netzwerke	47
3.4.4. Lokale Positionierung	47
3.4.4.1. Terrestrische Polarsensoren	47
3.4.4.2. Digitale Photogrammetrie.....	48
3.4.4.3. Lokale Netzwerke	49
3.4.4.4. Pseudolites	49
3.5. Zusammenfassung und Bewertung	50

4. HTO-Teilprojekt 33-2: Sensorgestütztes mobiles GIS	51
4.1. Nationalpark „Bayerischer Wald“	51
4.2. Motivation und Projektziele	52
4.3. Untersuchungsmethodik.....	54
4.4. Zentrales GIS der Nationalparkverwaltung	55
4.4.1. Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“	55
4.4.2. Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen	57
4.5. Anforderungsanalyse der Beispielapplikationen.....	59
4.5.1. Dauerbeobachtungsflächen	59
4.5.2. Topographische Objekte	61
4.5.3. Inventurbezogene Objekte.....	61
4.5.4. Künstliche Nase.....	67
4.6. SmobGIS Komponenten	68
4.6.1. 3D-Positionierungssystem.....	68
4.6.2. Wearable-Computer, Tablet-Notebook und Handheld-PC	70
4.6.3. Applikationssoftware ArcPad und Konzept digitaler Datenfluss	72
4.6.4. Datenübertragung mit Mobilfunk	73
5. Satellitengestützte Positionierung in forstlicher Umgebung	74
5.1. Einsatzmöglichkeiten und Problembeschreibung.....	74
5.1.1. GPS in der Forstwirtschaft.....	74
5.1.2. Genauigkeits- und zuverlässigkeitsrelevante Einflussfaktoren	75
5.1.3. Differentielles GPS-Verfahren in Echtzeit.....	79
5.2. Genauigkeits- und Navigationspotential der GPS-Positionierung im Forst	81
5.2.1. Genauigkeitspotential unterschiedlicher Empfängertechnologien.....	81
5.2.2. Empfängervergleich ST-Forschungsprojekt 93	82
5.2.3. Untersuchungen von Fragestellungen zur NPV-Inventur	85
5.3. Diskussion optimierter Auswertestrategien im Positionsraum	89
5.3.1. Analysesoftware KONMEA.....	89
5.3.2. DGPS-Korrekturdaten.....	91
5.3.3. Signalspezifische Fehler.....	93
5.3.4. Geometrische Fehler	95
5.3.5. Ansätze für neue Positionsraum-Filter.....	99
5.3.6. Ergebnisse Positionsraum-Filter	102
5.4. Zusammenfassende Bewertung	104
6. Positionierung mit handgetragendem 3D-Polarsensor	105
6.1. Sensorkomponenten und Beobachtungsgrößen LaserAce 300	105
6.1.1. Richtungsbestimmung mit Magnetsensor	105
6.1.2. Distanzmessung mit Laserimpulsen	106
6.1.3. Elektronische Neigungsmessung	108
6.2. Genauigkeits- und zuverlässigkeitsrelevante Aspekte der Positionierung mit handgetragendem 3D-Polarsensor.....	108
6.2.1. Auswirkungen instrumenteller und verfahrenstechnischer Einflussfaktoren	108
6.2.2. Zentrierhilfe <i>OptoLot</i>	112
6.3. Konventionelle Messverfahren.....	113
6.3.1. Terrestrische dreidimensionale Einzelpunktbestimmung	113
6.3.1.1. Fehlerabschätzung Einzelpunktbestimmung	114
6.3.1.2. Testmessungen Einzelpunktbestimmung	115
6.3.2. 3D-Polarzug	116
6.3.2.1. Fehlerabschätzung 3D-Polarzug	117
6.3.2.2. Testmessungen 3D-Polarzug	118

6.4. DGM gestützte 3D-Positionierung (DGMMatch)	121
6.4.1. Digitales Geländemodell aus hochaufgelösten Laserscannerdaten.....	122
6.4.1.1. Flugzeuggestütztes Laserscanning	122
6.4.1.2. DGM-Testgebiete Nationalpark Bayerischer Wald	123
6.4.2. Basisberechnung und softwaretechnische Umsetzung DGMMatch.....	126
6.4.2.1. Eingabe- und Protokolldateien.....	126
6.4.2.2. Berechnungsschritte und Ergebnisse Basisberechnung	127
6.4.3. Einflussgrößen DGMMatch	131
6.4.4. Diskussion von Entscheidungshilfen und optimierten Auswertestrategien.....	134
6.4.4.1. Grafische und numerische Entscheidungshilfen	134
6.4.4.2. AutoDGMMatch	136
6.4.4.3. Zusatzbedingungen	138
6.4.4.4. Flecken-Lösung.....	138
6.4.4.5. MultiDGMMatch	139
6.4.5. Definition und Bewertung eines strategieoptimierten DGMMatch-Verfahrens	142
6.4.5.1. DGMMatch Version 1.65	142
6.4.5.2. Ergebnisse Testberechnungen.....	143
6.4.5.3. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick DGMMatch.....	145
7. Beispielapplikationen aus der forstlichen Praxis	147
7.1. Dauerbeobachtungsflächen.....	147
7.2. Topographische Objektaufnahme	149
7.3. Waldinventur mit sensorgestütztem mobilen GIS	151
7.3.1. Waldinventur Nationalpark Bayerischer Wald.....	151
7.3.2. Bundeswaldinventur II.....	152
7.4. GPS-gestützte Erfassung inventurbezogener Objektpunkte.....	155
7.4.1. Inventurpunktgitter Nationalpark Bayerischer Wald	155
7.4.2. Verknüpfungspunkte von Informationsschichten	158
7.5. Satellitengestütztes Wildtiermonitoring	159
8. Schlussbetrachtung.....	160
Abkürzungsverzeichnis	161
Abbildungsverzeichnis	163
Tabellenverzeichnis	167
Literaturverzeichnis	169
Anhang A: Produktvergleiche mobile Rechner/Applikationssoftware	184
Anhang B: Technische Spezifikationen SmobGIS-Komponenten.....	186
Anhang C: Testpunkte DGMMatch	188

1. Einführung

1.1. Grundgedanke eines sensorgestützten mobilen GIS

Information, Kommunikation und Mobilität - diese drei Schlagworte prägen den derzeitigen Wandel von der Industriegesellschaft zur Informations- und Wissensgesellschaft. Der Bedarf an jeglicher Art von Informationen, Produkten oder Serviceleistungen (anything), zu jedem Zeitpunkt (anytime) an jedem beliebigen Ort dieser Welt (anywhere) in einer adäquaten Form individuell zugeschnitten (anyhow) wächst stetig an [DENGLER et al. 2001]. Diese Entwicklung ist noch lange nicht abgeschlossen und hat tiefgreifende Auswirkungen sowohl auf private als auch berufliche Lebensbereiche. So werden beispielsweise in [CISCO 2003] oder [WEISS, SCHRÖTER 2001] für die Zukunft völlig neue Arbeitsweisen skizziert, die von einem mobilen Arbeitnehmer ausgehen, der seine Aufgaben größtenteils mobil über einen „Multimedia-Arbeitsplatz der Zukunft (MAP)“ für sein Unternehmen erledigt. In der Stärkung der Mobilität wird hierbei vor allem der Schlüssel zu mehr Produktivität gesehen. Aber auch im privaten Bereich wächst das Bedürfnis nach mehr Beweglichkeit stetig an. Die Menschen verbringen immer mehr Zeit „in der Bewegung“ und wollen während dessen produktiv sein, kommunizieren oder Informationen vor Ort erhalten und nutzen. Dieser Wandel wurde und wird durch die rasanten technischen Entwicklungen in den Bereichen der digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie (z. B. Mobilfunk) möglich, die praxistaugliche mobile Hardwarelösungen, neue Kommunikationsmedien wie das Internet und bedarfsgerechte Anwendungen in Form von mobilen Diensten hervorbringen. In geeigneter anwendungsspezifischer Kombination können sie als mobiles Informationssystem (IS) eingesetzt werden, die es dem Menschen erlauben, unabhängig von einem festen Standort, digitale Daten unterschiedlichen Typs und Inhaltes zu verarbeiten. In vielen Fällen handelt es sich hierbei um Informationen mit einem Raumbezug, über den sie direkt (z. B. durch Koordinaten) oder indirekt (z. B. durch Beziehungen) mit einer Position auf der Erde verknüpft sind, so dass sie auch als Geoinformation oder in datenverarbeitungstechnischer Form als Geodaten bezeichnet werden [SCHILCHER 2003]. Die darin enthaltene raumbezogene Information kann sich sowohl auf großräumige Zusammenhänge von Wirtschaftsräumen oder Verkehrswegen als auch auf lokale Objekte wie Gebäude, Bäume oder Leitungen beziehen. Die Erfassung, Verarbeitung, Modellierung, Analyse, Verwaltung und Visualisierung von Geodaten erfolgt in dafür angepassten digitalen raumbezogenen Informationssystemen, den Geoinformationssystemen (GIS), die je nach Anwendungsgebiet in speziellen Ausprägungen existieren und in der Regel zentral vorgehalten werden. Beispiele hierzu sind kommunale IS, Netz-, Umwelt- oder Land-IS. Auf Grund der immer komplexer werdenden Fragestellungen, die heute mit Hilfe von Geodaten bearbeitet werden, steigen neben einem erhöhtem Kosten- und Zeitdruck auch die Anforderungen an die Qualität und Quantität raumbezogener Daten sowie deren Analysemöglichkeiten an. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, bietet sich der Einsatz von **mobilen Geoinformationssystemen** (mobGIS) an. Durch sie ist es möglich, bestehende Arbeitsabläufe oder Vorgänge verschiedenster Aufgabenbereiche durch eine „vor Ort“ Verarbeitung [WUNDERLICH 2000] **effizienter, produktiver** oder auch **sicherer** zu gestalten. Voraussetzung hierfür ist ein geschlossener digitaler Datenkreislauf zwischen stationärem und mobilem GIS, der sowohl den Zugriff auf ein einzelnes als auch auf verteilte GIS ermöglicht, sowie der Einsatz von geeigneten und aufeinander abgestimmten Sensoren, Datenspeichern und Anwendungsprogrammen. Die hierbei verwendete Sensorik kann neben den für die meisten Applikationen notwendigen Positionierungssensoren auch optische, chemische oder biologische Sensoren beinhalten. Damit ist der Grundgedanke für ein **sensorgestütztes mobiles GIS** (**SmobGIS**) gefunden, das den inhaltlichen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet (Abb. 1-1).

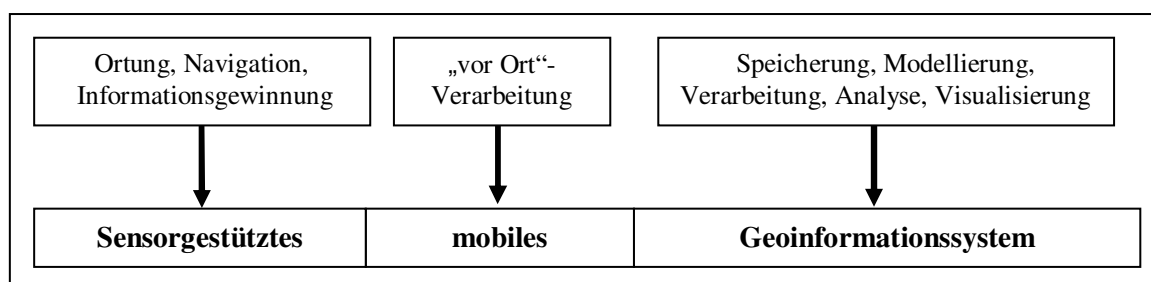


Abbildung 1-1: Grundgedanke eines SmobGIS

1.2. Anwendungsfälle und Vorteile mobiler Geodatenverarbeitung

Grundsätzlich müssen bei der mobilen Verarbeitung von digitalen Geodaten die drei Anwendungsfälle **Auskunft**, **Erfassung** und **Fortführung** unterschieden werden, da sie wegen ihrer unterschiedlichen Anforderungen an die eingesetzten Hard- und Softwarekomponenten, dem notwendigen Funktions- und Methodenangebot sowie dem Datenmanagement nachhaltigen Einfluss auf die Konzeption, die Realisierung und die Anwendungsmöglichkeiten eines mobilen raumbezogenen Informationssystems haben. In Anlehnung an [ROSCHLAUB, SCHILCHER 1995] und [BILL, ZEHNER 2001] können diese drei Szenarien folgendermaßen charakterisiert werden:

Auskunft:
Abfrage von geometrischen, topologischen, thematischen oder dynamischen Eigenschaften von Geoobjekten oder von Ergebnissen einer auf ihnen basierenden raumbezogenen Analyse.
Erfassung:
Gewinnung noch nicht vorhandener Geoinformationen durch direkte Dateneingabe oder durch den Einsatz geeigneter Erfassungssensoren und –methoden mit sofortiger oder zeitversetzter Auswertung und anschließender Erweiterung des Datenbestandes eines zentralen GIS. Die Erfassung raumbezogener Daten ist eine höchst arbeitsintensive und kostenaufwendige Tätigkeit, vor allem auch deshalb, weil die Anforderungen an Vollständigkeit, Aktualität, Fehlerfreiheit und Struktur des Datenbasis sehr hoch sind.
Fortführung:
Aktualisierung einer bestehenden Geodatensammlung durch das Neuentstehen, Wegfallen oder die Veränderung von Eigenschaften und Beschreibungen eines Geoobjektes, um den digitalen Datenbestand den laufenden Veränderungen der bisher erfassten Objekte in der realen Welt anzupassen.

Tabelle 1-1: Anwendungsfälle beim Einsatz mobiler GIS

Erfolgt die Auskunft, Erfassung und Fortführung von Geodaten in zeitlich und räumlich getrennten Vorgängen sowie unter Einsatz analoger Messgeräte und Datenspeicher, dann ist dies mit den folgenden Nachteilen verbunden:

- *Höhere Fehleranfälligkeit:*
Jeder zusätzliche Arbeitsschritt birgt das Risiko in sich, Fehler zu machen. So besteht beispielsweise bei einem Wechsel vom analogen zum digitalen Datenformat, die Gefahr Eingabe- oder Digitalisierungsfehler zu machen. Auch kann es zu Interpretationsfehlern kommen, wenn die Auswertung nicht von demselben Bearbeiter durchgeführt wird, der die Aufnahme vor Ort durchgeführt hat.
- *Informationsverlust durch Medienbrüche:*
Erzwingt ein Arbeitsschritt einen Wechsel des Datenformates, dann kann die Datenkonvertierung zu einem Informationsverlust führen, wenn die Datenformate nicht vollständig miteinander kompatibel sind. Dasselbe gilt bei der Verwendung von unterschiedlichen Geodatenmodellen.
- *Mehraufwand:*
Räumlich und zeitlich getrennte Vorgänge bergen das Risiko in sich, Arbeitsschritte wiederholen zu müssen. Werden beispielsweise bei einer Auswertung einer Aufnahme erst im Büro Fehler festgestellt, so zieht das in der Regel kostenintensive Nachmessungen oder Korrekturarbeiten mit sich.
- *Geringere Datenquantität und -qualität:*
Analoge Messtechniken sind nicht so genau, zuverlässig und schnell bei der Positionierung oder Objekterfassung in Echtzeit wie moderne, digitale Sensorik. Dadurch verringert sich neben der Datenqualität auch die zu erfassende Datenmenge und der Verfahrensablauf ist langsamer.
- *Einschränkungen bei Ortung/Navigation:*
Eine kombinierte Darstellung von eigener Position und grafisch visualisierten Geodaten (Karte, Luftbild) erlaubt in vielen Fällen eine wesentlich einfachere, schnellere und flexiblere Ortung bzw. Navigation zu Objekten. So kann beispielsweise eine Route kurzfristig geändert und neu berechnet werden, um eine Gefahrenstelle sicher zu umgehen. Grundvoraussetzung hierfür ist eine digitale Kopplung der verwendeten Positionierungssensoren mit der elektronischen vorgehaltenen Karte in Echtzeit, die mit analogen Komponenten nicht realisierbar ist.

Werden hingegen mobile raumbezogene Informationssysteme eingesetzt, die je nach Anwendung verschiedene digitale Positionierungssensoren, Messverfahren sowie adäquate Visualisierungs- und Analysekomponenten miteinander kombinieren, dann können die Vorteile einer mobilen Geodatenverarbeitung genutzt werden, wie sie u. a. in [INGENSAND 1998], [WILTSCSKO 1999], [WUNDERLICH 2001] oder [RANZINGER 2002] praxisbezogen diskutiert und zusammenfassend in Tabelle 1-2 dargestellt werden. Demnach liegen die wesentlichen Vorteile in der Beauskunftung sowie der geometrischen Erfassung und Interpretation eines Objektes in unmittelbarer Nähe zu diesem Objekt. Dadurch kann zum einen eine permanente visuelle Kontrolle am Objekt erfolgen, wodurch Fehlinterpretationen vermieden werden können, zum anderen wird eine interaktive Steuerung von Arbeitsabläufen, beispielsweise durch einen grafischen Soll-Ist-Vergleich, ermöglicht. Des Weiteren können Objekteigenschaften in Bezug zur Umgebung abgefragt, zeitnah weiterverarbeitet sowie Informationsverluste durch Ausschluss von Medienbrüchen und durch die Verwendung einer auf das stationäre Informationssysteme hinsichtlich Datenformat und Datenmodell abgestimmten Datenspeicherung vermieden werden. Das Resultat sind effizientere, und damit Kosten sparende Arbeitsabläufe, sowie eine Verbesserung der Datenqualität und –quantität, wie Beispiele aus der Praxis in [KÜHL 1999] oder [SCHILCHER et al. 2002] zeigen. Außerdem eröffnen sich durch den Einsatz mobiler raumbezogener Informationssysteme Möglichkeiten für die Konzeption neuer Dienstleistungsprodukte in Form von ortbezogenen Diensten, auf die näher in Kap. 2 eingegangen wird.

Funktion	Vorteil
Orientierungs-oder Navigationassistentz	Darstellung der Position in digitaler Karte, flexible, Routenführung zum Zielobjekt (Zeitgewinn, höhere Sicherheit)
Kontrollfunktionen, Konsistenzprüfung	Qualitätsprüfung geometrischer, grafischer und thematischer Objektattribute hinsichtlich Vollständigkeit und Plausibilität direkt vor Ort
Einheitliches, digitales Datenformat und –modell	Vermeidung von Medienbrüchen, Datenkonvertierung oder Migrationsvorgängen (Gefahr von Informationsverlust)
In-situ Animation, Information	Schnelle Beurteilung, Reaktionsauslösung
Digitale Protokollierung	unmittelbarer Nachweis des Vorgangs
Zeitgewinn	Einsparung von Nachmessungen, zeitnahe Arbeitsabläufe, Aktualität

Tabelle 1-2: Vorteile der „vor Ort“ Verarbeitung raumbezogener Daten

1.3. Aufgabe und Bedeutung der sensorgestützten Positionierung

Der Einsatz von Sensoren für eine Positionsbestimmung ist bei vielen Anwendungen von mobilen raumbezogenen Informationssystemen zwingend erforderlich, da sie die erforderlichen Positionsinformationen für die **Ortung** oder **Navigation** von Objekten in einem eindeutig definierten Raumbezugssystem bereitstellen. Die Ortung wird dabei im Sinne einer Verortung als die direkte Verknüpfung eines Objektes mit einer Position verstanden, die durch absolute (= Koordinatensatz x, y, z) oder relative (= Koordinatendifferenzen, Distanz, Richtung) Positionsinformationen definierbar ist. Bei der Navigation handelt es sich hingegen um das Hinführen zu einem Zielobjekt entlang einer vordefinierten Route durch das Zusammenspiel von aktueller Position und einer Führungsintelligenz [HOFMANN-WELLENHOF et al. 2003].

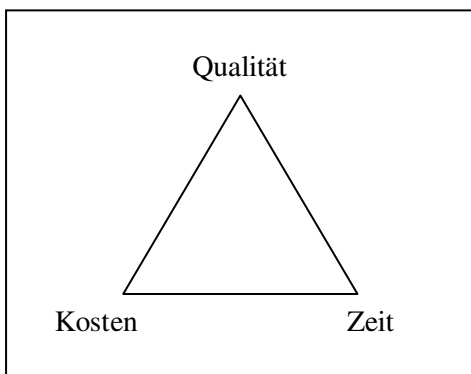


Abbildung 1-2: Abhängigkeiten zwischen Qualität, Kosten und Zeit

Die Qualität der Positionsinformationen hängt von dem verwendeten Sensor bzw. Sensorsystem sowie dem eingesetzten Messverfahren ab und kann anhand verschiedener Parameter definiert werden. Hierzu zählen u. a. die Genauigkeit, die Verfügbarkeit, die Integrität oder die Zuverlässigkeit der generierten Positionsinformationen. Die Größenordnung dieser Parameter variiert je nach den Anforderungen der gewünschten Applikation, wobei auch wirtschaftliche Aspekte wie Kosten- und Zeitaufwand eine wichtige Rolle spielen. Die Positionierung soll zum einen so genau und vollständig wie notwendig und zum anderen so wirtschaftlich wie möglich erfolgen. Diese Abhängigkeiten zwischen Qualität, Kosten und Zeit müssen bei der Konzeption eines SmobGIS beachtet werden (Abb. 1-2).

Des Weiteren stellt die Positionsgenauigkeit einen wesentlichen Bestandteil der Datenqualität eines GIS dar [BILL, ZEHNER 2001]. Nicht nur bei der mobilen Nutzung raumbezogener Informationen, sondern auch bei der anschließenden Weiterverarbeitung der Daten in einem stationärem Geoinformationssystem fällt der Kenntnis über eine ausreichend genaue und zuverlässige Position eine zunehmend tragende Rolle zu. Grund hierfür ist der verstärkte Einsatz von GIS-basierten Analysen zur Lösung komplexer, raumbezogener Aufgaben, bei denen verschiedene Informationslayer verknüpft werden müssen. Die Abbildung 1-3 zeigt hierzu ein Anwendungsbeispiel aus der Forstwissenschaft bei dem Daten aus dem forstlichen Inventurverfahren und einer Laserscannerbefliegung sowie Luft- und Satellitenbilder miteinander verknüpft werden müssen. Diese Verknüpfung ist nur über einen eindeutigen Raumbezug möglich, der in diesem Fall durch die Koordinaten eines Inventur- oder Passpunktes realisiert ist. Liegen die Koordinaten nicht mit einer ausreichend hohen Genauigkeit vor, dann sind keine fehlerfreien Analysen im GIS möglich. Untersuchungen zu dem genannten Anwendungsbeispiel haben gezeigt, dass die hierbei zu verwendenden Inventurpunkte mit einer wesentlich höheren absoluten Genauigkeit benötigt werden, als dies bisher gefordert war [CZAJA 2003]. Das führt letztendlich dazu, dass sich die Bedeutung der „Koordinate“ im Forstwesen ändern wird. Stand bei den Inventurverfahren bisher die Sachdatenerfassung mit der Koordinate als Attribut im Vordergrund, so wird in Zukunft neben der attributiven Objekterfassung auch eine ausreichend genaue und zuverlässige Positionierung von Bedeutung sein. Die Tatsache, dass in einer forstlichen Umgebung auch keine Alternativen für die Realisierung des Raumbezuges wie im urbanen Gebiet existieren (z.B. Adresse, Postleitzahl), verstärkt noch die Notwendigkeit, sensorgestützte Positionierungsverfahren für den forstlichen Anwendungsbereich zu entwickeln und einzusetzen. Um dies möglichst effizient realisieren zu können, ist der Einsatz moderner, geodätischer Sensoren und Messverfahren in Kombination mit einem mobilen GIS in den Inventurverfahren notwendig. Die Systemlösung muss hierbei auf die besonderen Messbedingungen im Forst hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Ergonomie oder Robustheit optimal angepasst sein.

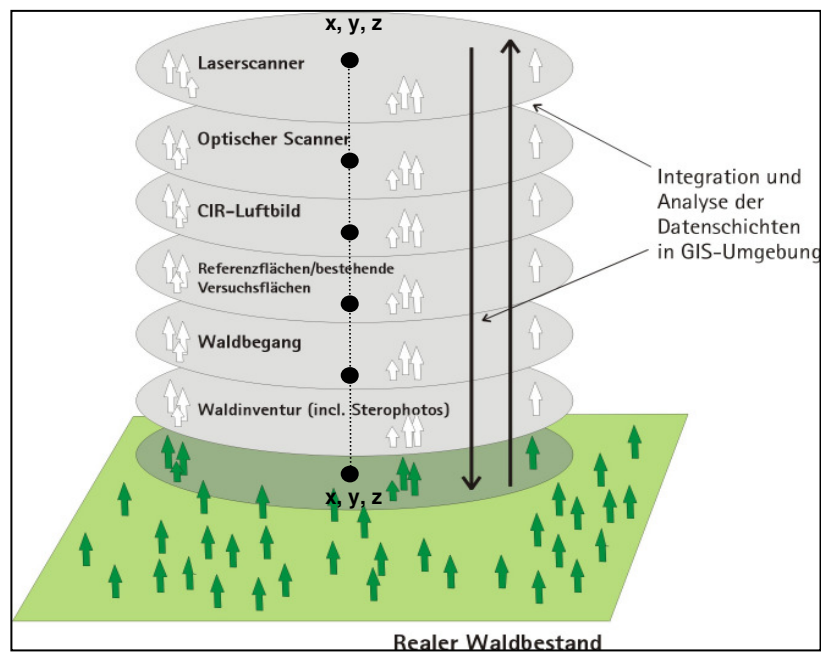


Abbildung 1-3: Verknüpfung von Informationsschichten [nach HEURICH 2002]

1.4. Zielsetzung und Übersicht

Die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Aspekte führen zu der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, die aus zwei Schwerpunkten besteht und inhaltlich folgendermaßen gegliedert ist:

1. Allgemeine und anwendungsoptimierte Systemkonzeption eines SmobGIS

Es existiert zum Thema „mobiles GIS“ wenig Fachliteratur, die diese Technologie umfassend sowohl theoretisch, konzeptionell als auch aktuell behandelt. Bisher werden nur Teilbereiche wie beispielsweise der Einsatz von ortsbezogenen Diensten, den Location Based Services (LBS), schwerpunktmäßig behandelt oder anwendungsspezifische Praxisbeispiele veröffentlicht und diskutiert. Deshalb wird innerhalb des **Kapitels 2** dieser Arbeit näher auf die **Grundlagen und Begriffe von mobilen raumbezogenen Informationssystemen** eingegangen und diese anhand einiger Praxisbeispiele näher beschrieben.

Anschließend erfolgt in **Kapitel 3** die allgemeine **Definition und Beschreibung der vier zentralen Komponenten eines SmobGIS** sowie eine ausführliche Beschreibung der für eine Konzeption zu beachtenden Kriterien. Des Weiteren werden die für die Einzelkomponenten zur Verfügung stehenden Technologien aufgeführt und zusammenfassend erläutert.

Die **Konzeption und Realisierung eines SmobGIS** unter Berücksichtigung von applikationsabhängigen Spezifikationen wird **anhand eines aktuellen Beispiels aus dem Bereich des Forstwesens in Kapitel 4** beschrieben. Die hierfür notwendigen Arbeiten wurden im Rahmen eines am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung respektive der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald realisierten Forschungsprojektes zum Thema „Sensorgestütztes mobiles GIS“ durchgeführt. Neben der Beschreibung der Projektidee und der örtlichen Gegebenheiten im Nationalpark Bayerischer Wald behandelt das Kapitel ausführlich die Anforderungsanalyse der ausgewählten Beispielapplikationen und stellt die im Rahmen des Projektes verwendeten Komponenten sowie den realisierten Datenfluss vor.

2. Zuverlässige und präzise 3D-Positionierung im Forst

Um die oben skizzierten Vorteile einer „vor Ort Verarbeitung“ von raumbezogenen Informationen nutzen zu können, müssen die Positionssensoren eines SmobGIS unter den gegebenen Bedingungen eine ausreichend genaue und vor allem zuverlässige Position liefern. Am Beispiel der Realisierung von SmobGIS im Nationalpark Bayerischer Wald, in dem die schwierigen Messbedingungen eines Naturwaldes im Mittelgebirge vorherrschen (Abschattungen, geringe Festpunktanzahl, schwer begehbares Gelände), werden hierzu praxisrelevante Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von GPS und handgetragenen 3D-Polarsensoren in den beiden folgenden Kapiteln näher diskutiert und neue Lösungsansätze vorgestellt.

Das **Kapitel 5** behandelt hierbei die **satellitengestützte Positionierung in forstlicher Umgebung**. Neben einer kurzen Beschreibung der im Forst verwendeten GPS-Sensortechnik, der Messparameter und – verfahren, werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die GPS-Beobachtungen erläutert sowie Möglichkeiten für eine zuverlässigere Bewertung auf Basis der resultierenden Positionsergebnisse aufgezeigt. Ziel war es, Bewertungskriterien zu erarbeiten, die es auch fachfremden Nutzern von SmobGIS erlauben, eine schnelle und korrekte Aussage über die Positionsqualität vor Ort zu treffen.

Auf die **Sensorkomponenten, Beobachtungsgrößen und Messmethoden eines handgetragenen 3D-Polarsensors** geht **Kapitel 6** näher ein. Außerdem wird eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte optische Zentriervorrichtung für die Verbesserung der Messgenauigkeit, die Umsetzung eines 3D-Polarzuges als konventionelles Messverfahren und ein neuer, innovativer Ansatz für die 3D-Positionierung ohne bekannte Festpunkte auf Basis eines digitalen Geländemodells vorgestellt.

In **Kapitel 7** werden einige **Beispiele zur Erfassung und Fortführung von waldökologischen Objekten** gegeben, die im Rahmen des o. g. Forschungsprojektes im Nationalpark Bayerischer Wald untersucht oder realisiert wurden. Die Arbeit **schließt** mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf neue Entwicklungen und den zusätzlichen Forschungsbedarf.

2. Mobile raumbezogene Informationssysteme

2.1. Grundlagen raumbezogener Informationssysteme

Ein Informationssystem (IS) kann allgemein als ein System zur Speicherung, Wiedergewinnung, Verknüpfung und Auswertung von Informationen verstanden werden. Nach [BARTELME 2000] sind IS schalenweise aufgebaut (Abb. 2-1). Im Zentrum stehen die über eine Formalisierung der Information gewonnenen Daten, die in einer Datenbank zusammengefasst sind und durch ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) verwaltet werden. Die Verwaltung durch das DBMS umfasst die Datenmodellierung, -strukturierung und -speicherung. Über spezielle Funktionen, die um die Datenbank gruppiert sind, kann der Anwender die Daten aufgabenorientiert bearbeiten. Hierzu gehören beispielsweise Abfrage- und Auskunftsmodule, Interpolations- und Verschneidungsalgorithmen oder Transformationsfunktionen. Betrachtet man ein Informationssystem aus einer anderen Perspektive, dann ergibt sich nach [BILL, ZEHNER 2001] eine Unterteilung nach Hardware (Rechner und Peripherie), Software (Algorithmen und Programme), Daten (quantitative und qualitative Beschreibungen) sowie deren Benutzer (s. Abb. 2-2).

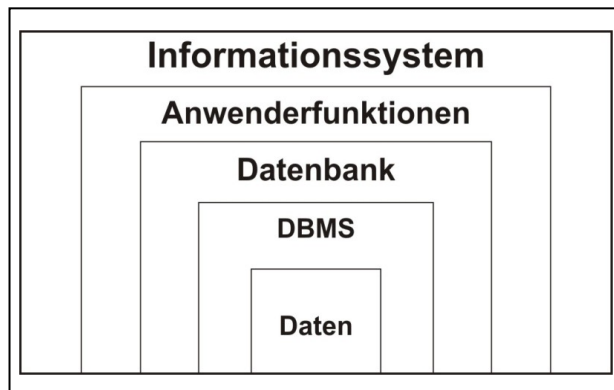


Abbildung 2-1: Schalenweiser IS-Aufbau

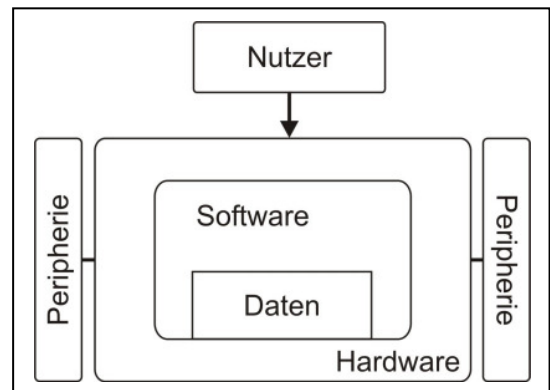


Abbildung 2-2: Komponentenweiser IS-Aufbau

Auf Grund eines immer stärkeren Einsatzes der Netzwerktechnologie sowie der Entwicklung von objektorientierten Verfahren, bei denen es keine strikte Trennung mehr zwischen Daten und den zugeordneten Methoden (Funktionalität) gibt, müssen diese Sichtweisen etwas modifiziert werden. Im Falle des schalenartigen Aufbaus bedeutet dies Veränderungen auf der konzeptionellen Ebene, denn für jede Objektklasse, die sowohl den Datentyp als auch die anwendbaren Methoden definiert, werden geeignete Anwenderfunktionen festgelegt. Gelegentlich können diese Funktionen auch zu einem Client „ausgelagert“ werden, um die Belastung für die Netzwerkverbindung zu verringern. Es ergibt sich somit eine mehrstufige Struktur für ein Informationssystem, wie sie in Abbildung 2-3 dargestellt ist. Der Client, der in der Regel einen Standard-Browser verwendet und durch Scripts unterstützt wird (z.B. Java, VBScript), kann über das Netzwerk mit einem Web-Server kommunizieren, der an einen Applikations-Server gekoppelt ist. Dieser Server bündelt die Vorgänge, die für die Erweiterung der Datenbank um die mittels einer Objektbeschreibungssprache definierten Methoden der einzelnen Objektklassen, notwendig sind.

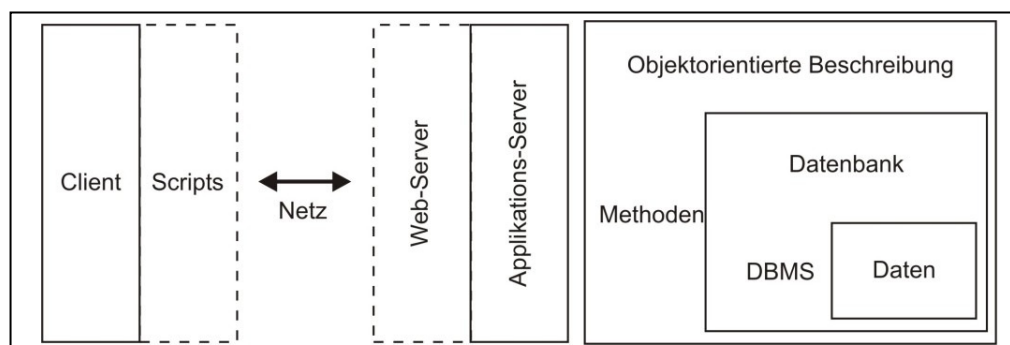


Abbildung 2-3: Mehrstufiges Informationssystem [nach BARTELME 2000]

Erweitert man dieses Konzept um die Möglichkeit, dass der Client die für ihn notwendigen Informationen von verschiedenen Servern beziehen kann, so liegt ein Informationssystem nach dem Client-Server-Prinzip vor (s. Abb. 2-4). Die einzelnen Server bieten jeweils themenbezogene Daten an, die durch den Anwender selbst oder mit Hilfe von Brokern und Agenten zusammengestellt werden. Sie agieren zwischen dem Client und den Servern. Der Broker wird hierbei als Makler verstanden, der die Bedürfnisse des Anwenders registriert und daraufhin die erforderlichen Server ermittelt, während der Agent persönliche Vorlieben des Nutzers vordefiniert, um auf die Anfragen effizienter reagieren zu können. Weitere Details zur Agenten-Technologie finden sich z. B. in [BRENNER et al. 1998] oder [GUGER et al. 2000].

Anhand dieser Darstellungen wird deutlich, dass der Begriff Informationssystem mit seinen zahlreichen Unterkategorien nicht eng abgegrenzt werden kann. Um den vielseitigen Anforderungen zu genügen, ist kein zentrales, in sich geschlossenes System notwendig, sondern ein Konzept, das ein Netzwerk aus Teilsystemen erlaubt (s. Abb. 2-5). Jedes dieser Teilsysteme bearbeitet spezifische Aufgaben und kann über kompatible Schnittstellen Daten und Werkzeuge mit anderen Teilnehmern im Netz austauschen. Der Vorteil solcher verteilter Systeme liegt in ihrer hohen Flexibilität, denn sie können optimal an die vorherrschenden Bedingungen angepasst werden. Unabhängig davon, ob es sich um ortsfeste oder mobile Informationssysteme handelt. In Bezug auf raumbezogene Informationen ist hierbei die kombinierte Nutzung von verteilten, heterogenen Geodatenbanken von großer Bedeutung [DONAUBAUER 2004].

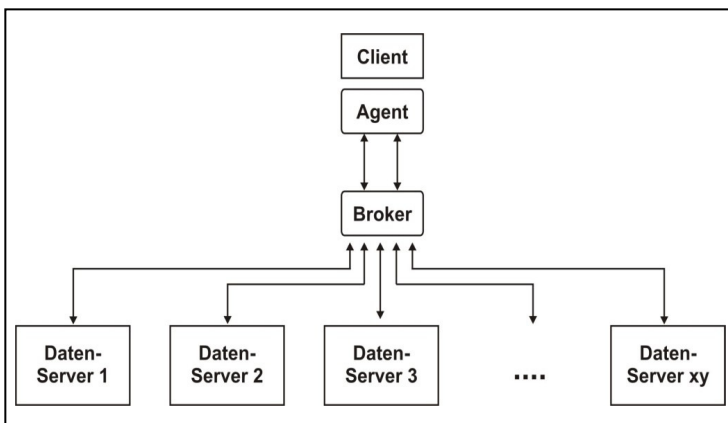


Abbildung 2-4: Client-Server-Prinzip mit Agent und Broker

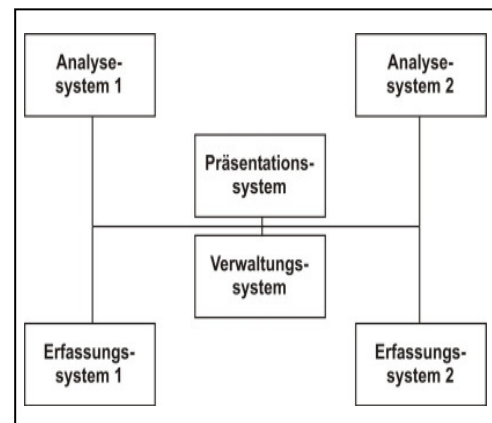


Abbildung 2-5: Verteilte Systeme

2.1.1. Begriffsbestimmung Geoinformationssystem

Nach [HAKE et al. 2002] ist die Art des Datenbezuges eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale zwischen Informationssystemen. Es können sowohl Daten mit Person-, Sach-, Zeit- oder Raumbezug als auch deren Kombinationen verarbeitet werden. **Raumbezogene Informationssysteme (RIS)** zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei Personen-, Sach- und Zeitangaben stets auch einen Raumbezug beschreiben. Dieser bezieht sich auf jedes einzelne Objekt durch geometrische Informationen über Lage und Form sowie auf Objekt-Beziehungen durch topologische Informationen, die unabhängig von der Metrik die räumlichen Verbindungen bzw. Anordnung zwischen Objekten beschreiben.

Die metrische Basis für die mehrdimensionalen, geometrieorientierten Daten eines RIS wird als einheitliches Raumbezugsystem bezeichnet. Es ermöglicht die eindeutige geographische Zuordnung und fachübergreifende Verknüpfung der Geodaten. Durch die Wahl eines geodätischen Bezugssystems mit definiertem Datum und Koordinatensystem erfolgt die mathematische Festlegung für ein koordinatives Bezugssystem, das nach [BILL 1999] die primäre Metrik definiert. Alternativ dazu kann in einem RIS auch mit einer sekundären Metrik gearbeitet werden, die durch indirekte oder symbolische Bezüge realisiert wird. Hierzu zählen z. B. Kennziffern (Postleitzahlen, Flurstücksnummer), Namen als räumliche Bezeichnungen (Orts- oder Stadtteil) oder Adressen (z.B. Strasse, Hausnummer). Unterschiedliche Raumbezugsformen können mittels einer Geokodierung ineinander überführt werden. So lassen sich z.B. Adressen mit digitalen Straßendaten, die mit Hausnummernbereiche belegt sind, verorten. Die Koordinate oder Adresse stellen hierbei den sog. Geocode dar, der die Position eines räumlichen Elementes beschreibt oder mit dem der Standort eines bestimmten Eintrages in einer Datenbank identifiziert werden kann.

Neben dem Raumbezug stellt vor allem die Zeit eine bedeutende Bezugseinheit in einem RIS dar. Ihr können nach [BARTELME 2000] sowohl ein räumlich-eindimensionaler Bezug (Zeitachse definiert in einem Zeitbezugssystem) als auch topologische Eigenschaften (davor - danach) zugeordnet werden. Die Zeit kann hierbei nicht absolut, sondern nur relativ zu einem vordefinierten Kalender gemessen werden, wobei eine normierte Zeitangabe durch UTC (Universal Time Coordinated) nach ISO 8601 möglich ist. Eine umfassende Berücksichtigung der Zeit im Zusammenhang mit Geoinformationssystemen ist derzeit Gegenstand vieler Forschungsarbeiten [u. a. HOSSE 2005, PEUQUET 2002] und soll an dieser Stelle nicht näher vertieft werden, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf raumbezogenen Fragestellungen liegt.

Durch die Spezialisierung auf Informationen, die einen Orts-, Lage-, Raum- (= 3D) und Zeitbezug (= 4D) aufweisen, ergibt sich der Begriff der *Geoinformation*, und damit auch der namentliche Übergang vom raumbezogenen Informationssystem zum Geo-Informationssystem (GIS). Auf Grund der vielen verschiedenen Einsatzgebiete von GIS und deren Heterogenität haben sich eine ganze Reihe von Definitionen und Begriffsbestimmungen für Geoinformationssysteme herausgebildet. Einen detaillierten Überblick mit fachlicher Diskussion hierzu findet man in [BARTELME 2000], [BILL, ZEHNER 2001] oder [SCHILCHER 2003]. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Definition aus [LOTHER 2003] verwendet werden, die sowohl Aussagen über die wesentlichen Komponenten als auch die Einsatzbereiche eines GIS trifft:

„Ein GIS ist ein Instrument in Gesellschaft, Politik, Verwaltung, Recht und Wirtschaft für die Dokumentation, Planung und Entscheidungsfindung bei Sachverhalten, die auf Grund und Boden –den Raum- bezogen sind. Es besteht aus:

- *einer geographischen Datenbank, in deren Datenbasen die Modelle raumbedeutsamer Strukturen einer bestimmten Region dokumentiert sind*
- *Verfahren und Methoden, in denen die Modelldaten erfasst, aktualisiert, präsentiert, assoziiert und analysiert werden können*
- *Schnittstellen für die Integration und die Kommunikation mit anderen EDV-Systemen*

Die Basis bildet ein einheitliches räumliches Bezugssystem, das die eindeutige geographische Zuordnung fachübergreifende Verknüpfung der raumbezogenen Daten ermöglicht.

Demnach kann ein GIS als ein auf spezielle Bedürfnisse ausgerichtetes Informationssystem verstanden werden, das die Verarbeitung von Geodaten erlaubt, die in einem sog. Geodatenmodell durch sinnvolle Reduktion und Ordnung abgebildet sind und in einer geographischen Datenbank (GeoDB) verwaltet werden (s. Abb. 2-6). Die Geodaten stellen die datenverarbeitungstechnische Form von Geoinformationen dar und können in die in Tabelle 2-1 aufgeführten Kategorien unterteilt und den beiden großen Teilkomplexen Geobasisdaten und Geofachdaten zugeordnet werden. Geobasisdaten beschreiben die Landschaft (Topographie) sowie die Liegenschaften der Erdoberfläche und werden im Wesentlichen von der Vermessungsverwaltung bereitgestellt. Hierzu zählen z. B. das automatisierte Liegenschaftsbuch (ALB) oder die digitale Flurkarte (DFK). Bei den Geofachdaten handelt es sich um Daten, die in den jeweiligen Fachdisziplinen erhoben wurden (z. B. Leitungs- oder Forstdaten). Grundsätzlich stellen Geodaten die wichtigste, kostenintensivste und bei konsequenter Fortführung auch langlebigste Komponente eines GIS dar. Es sei an dieser allerdings angemerkt, dass nicht alle raumbezogenen Informationssysteme automatisch ein GIS darstellen. So werden beispielsweise in der Ingenieurgeodäsie spezielle Tunnel-Informationssysteme eingesetzt, die ebenfalls einen sehr hohen räumlichen Bezug ausweisen.

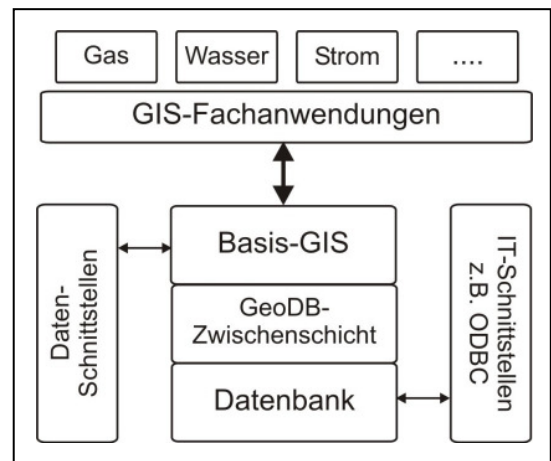


Abbildung 2-6: Standardarchitektur eines GIS

Geodatentyp	Beschreibung
Geometriedaten	Lage und Form der Objekte (Primärgeometrie)
Topologie	explizit gespeicherte räumliche Beziehungen
graphische Ausprägungen	Signaturen, Farbe, Typographie
Sachdaten	alphanumerische Daten zur Beschreibung der Semantik

Tabelle 2-1: Geodatentypen

2.1.2. Modelle der Erdgestalt

In einem GIS werden Teile der Erdoberfläche nach Lage und Höhe abgebildet. Die Abbildung erfordert einen Bezug zu einer mathematisch beherrschbaren und/oder physikalisch definierten Referenzfläche im dreidimensionalen Raum. Auf dieser Referenzfläche wird für die Angabe der Lage ein Koordinatensystem definiert, während die Höhe den Abstand relativ zu dieser Fläche beschreibt. Die wichtigsten vier Arten von Referenzflächen sind das Geoid, die Kugel, das Rotationsellipsoid sowie die Ebene.

Das *Geoid* stellt eine Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes in Höhe eines mittleren Meeresspiegels dar. Die Fläche wird in allen Punkten von den Lotlinien senkrecht geschnitten und setzt sich unter den Kontinenten hindurch fort. Da die Erdmasse nicht gleichmäßig verteilt ist, hat die Geoidfläche keine regelmäßige, sondern eine sehr komplexe Form, die sich nur durch Reihenentwicklung approximieren lässt. Auf Grund dieser Komplexität eignet sich das Geoid nicht als Referenzfläche für Lagekoordinaten. Stattdessen wird das mathematisch exakt berechenbare Modell eines *Rotationsellipsoides* verwendet, das durch die Angabe der Parameter a, b oder a, f geometrisch definierbar ist (s. Tab.2-2). In der Praxis wird zwischen mittleren und bestanschließenden Ellipsoiden unterschieden. Letztere sind nicht erdzentriert, sondern passen sich in ihrer Dimension und Lagerung der physikalisch definierten Erdoberfläche einer Region an (z. B. das Besselellipsoid in Deutschland). Mit der Einführung von globalen (Satelliten-) Positionierungsverfahren entstand zunehmend der Bedarf nach einem weltweit einsetzbaren, erdzentriertem Ellipsoid, wie es durch das mittlere Ellipsoid WGS84 (World Geodetic System) realisiert wurde.

Parameter	Bessel	WGS84
Große Halbachse (a [m])	6 377 397,155	6 378 137,000
Kleine Halbachse (b [m])	6 356 078,963	6 356 752,314
Abplattung (f)	1:299,1528128	1:298,2572236
Polkrümmungsradius (c [m])	6 398 786,349	6 399 593,626

Tabelle 2-2: Wichtige Referenzellipsoide

Referenzfläche	Bereich	Koordinatentyp
Ebene	< 10 km	Kartesisch
Kugel	< 200 km	Sphärisch
Rotationsellipsoid	> 200 km	Geodätisch
Rotationsellipsoid	Global	3D-kartesisch
Geoid	Global	Lotrichtung
Kugel	Global	geographisch

Tabelle 2-3: Referenzflächen Erdfigur

In vielen globalen GIS-Anwendungen wird die Erde vereinfacht als Kugel angenommen, um die mathematischen Berechnungen noch weiter zu erleichtern. Diese Annahme ist allerdings nur für den Maßstabsbereich 1: 10000000 und kleiner oder für Gebiete mit regionaler Ausdehnung zutreffend, da ansonsten der Unterschied zwischen Kugel und Ellipsoid zu groß ist. Ebene kartesische Koordinaten können bei großmaßstäblichen Anwendungen nur für kleine Gebiete verwendet werden, da sich sonst die Einflüsse der Erdkrümmung als Modellfehler auswirken. Eine Übersicht über mögliche Referenzflächen gibt Tab. 2-3.

Im Gegensatz zur Lage eignet sich das Geoid auf Grund seines Bezuges zum Erdschwerefeld als Höhenbezugsfläche für terrestrische Messverfahren. Daher ist für die gemeinsame Behandlung von Ergebnissen der Satellitengeodäsie, die zu *ellipsoidischen Höhen* h führen, und der terrestrischen Geodäsie, die Höhen im Schwerefeld bereitstellt (z. B. nivellierte *orthometrische Höhe* H^O), die Kenntnis der *Geoidundulationen* N erforderlich. Sie stellt die Abweichung des Geoids von einem gewählten Referenzellipsoides dar und kann für ein globales Referenzellipsoid bis zu 100 m betragen. Zwischen diesen drei Größen besteht näherungsweise die Beziehung $h = H^O - N$. Das aktuelle, amtliche Nivellementsnetz in Bayern verwendet hingegen die auf das *Quasigeoid* bezogenen *Nomalhöhen* H^N , die näher in Kap. 2.1.7 beschrieben werden.

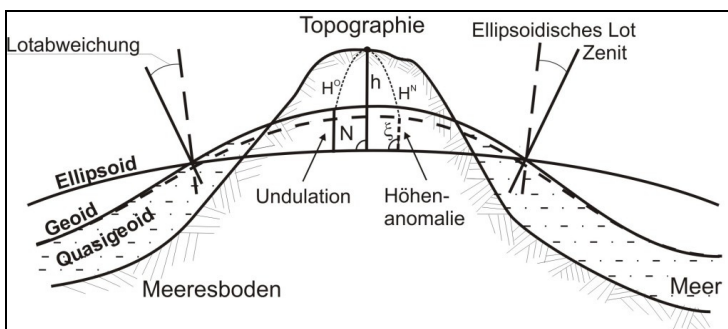


Abbildung 2-7: Referenzflächen

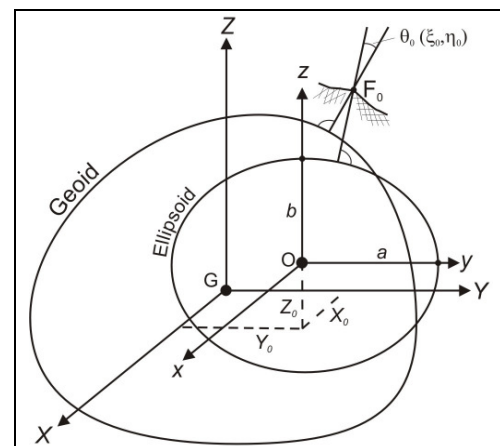


Abbildung 2-8: Geodätisches Datum

2.1.3. Geodätisches Datum

Mit Hilfe des Geodätischen Datums kann der räumliche Bezug eines Koordinatensystems zum Erdkörper hergestellt werden [TORGE 1991], d.h. es definiert die Dimension und die Lagerung eines nationalen Referenzellipsoids in einem globalen, geozentrischen Rahmen. Nach DIN 18709-1 (1995) gehören folgende Parameter zum Geodätischen Datum:

- die große Halbachse a und die Abplattung f des Ellipsoides
- die Orientierungselemente, die Achsdrehwinkel R_x, R_y, R_z
- der Ortsvektor T des Koordinatenursprungs
- erforderlichenfalls eine Maßstabskorrektur m

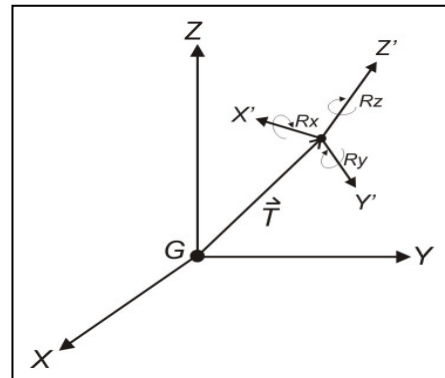


Abbildung 2-9: Orientierungselemente

Für die Festlegung des geodätischen Datums wurden i. d. R. für einen Fundamentalpunkt die physikalisch bestimmten Koordinaten mit den geometrisch definierten Koordinaten unter Berücksichtigung des verwendeten Referenzellipsoides in Relation gesetzt. Üblicherweise erfolgte dies bei den Lagenetzen durch die Gleichsetzung der geodätischen mit den astrogeodätischen Koordinaten des Fundamentalpunktes F_0 , so dass die Lotabweichung θ_0 bzw. ihre Komponenten ξ_0 und η_0 im Fundamentalpunkt zu Null wurden. Für die Orientierung der Lagenetze wurde das geodätische Azimut gleich dem astronomischen Azimut gesetzt, wodurch geometrisch gesehen die kleine Halbachse b des Rotationsellipsoides näherungsweise parallel zur Erdachse gestellt wird. Ausgehend von diesem Fundamentalpunkt wurden anschließend mittels Triangulation Gebrauchskordinatensysteme für ein bestimmtes Hoheitsgebiet realisiert. In diesem Fall (Achsen parallel, Achsdrehwinkel Null) zählen folgende Parameter zum geodätischen Datum:

- die große Halbachse a und die Abplattung f des Ellipsoides
- für einen Fundamentalpunkt F_0 die Lotabweichung θ bzw. ihre Komponenten ξ_0 und η_0 sowie die Geoidhöhe N_0 oder für den Ellipsoidmittelpunkt O die Koordinaten X_0, Y_0, Z_0

2.1.4. Geodätische Bezugssysteme

Zur Definition von geodätischen Bezugssystemen hat man nach [SCHNÄDELBACH 1998] grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

Dreidimensionales kartesisches geozentrisches Koordinatensystem $[P(X_G, Y_G, Z_G)]$

Der Ursprung liegt im Massenmittelpunkt der Erde (Geozentrum), die Z-Achse geht in Richtung einer mittleren Rotationsachse der Erde und die X-Achse bildet die Schnittlinie eines Referenzmeridians mit dem Äquator. In solchen Systemen werden z.B. die Satelliten des Global Positioning Systems (GPS) koordiniert. Sie eignen sich schlecht für anschauliche Darstellungen und damit auch für GIS.

Ellipsoidische Bezugssysteme

Die Erdoberfläche lässt sich in guter Näherung durch ein an den Polen abgeplattetes Rotationsellipsoid approximieren (s. Kap. 2.1.2). Damit entstehen, mit dieser Fläche verbundene, also geometrisch definierte ellipsoidische Systeme. Die Koordinaten lassen sich je nach Erfordernis in den folgenden Formen darstellen:

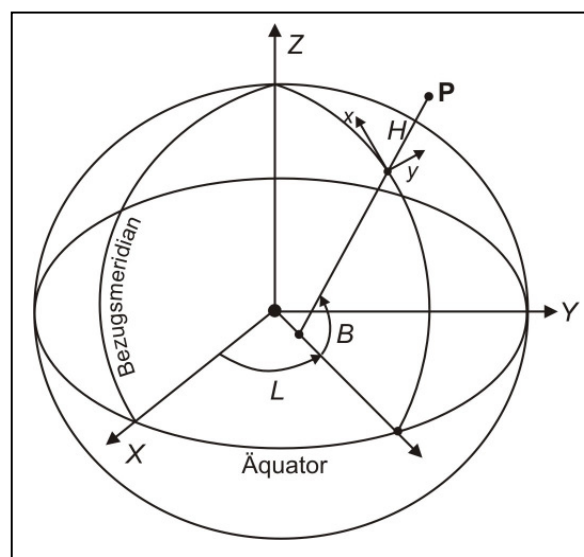


Abbildung 2-10: Ellipsoidisches Bezugssystem

a) dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem [P(X,Y,Z)]

Der Ursprung liegt im Mittelpunkt des Ellipsoides, die Z-Achse ist identisch mit der Rotationsachse, die X-Achse wird von der Schnittlinie einer Referenzebene mit dem Äquator gebildet. Diese Systeme eignen sich ebenfalls schlecht für die Darstellung von Vermessungsergebnissen und damit auch für GIS, sind aber wichtig für die Transformation zwischen verschiedenen Referenzsystemen.

b) geographische Koordinaten [P(B,L,H)]

Die geographischen Koordinaten eines Punktes setzen sich aus der geodätischen Breite *B*, der geodätischen Länge *L* und der ellipsoidischen Höhe *H* zusammen. Von Vorteil bei diesen Systemen ist der genäherte Bezug zur Lotrichtung und damit zu den Begriffen „Höhe“ und „Grundriss“ sowie die Möglichkeit der einheitlichen Koordinierung auch von großräumigen Projekten. Vermessungsergebnisse können gut dargestellt werden, nachteilig sind die schwierigen Berechnungen bei großmaßstäblichen Arbeiten, da keine ebene Trigonometrie verwendet werden kann.

c) Projektionskoordinaten [P(x,y)]

Mit diesen Koordinaten werden Teile der Ellipsoidoberfläche durch kartesische Koordinaten beschrieben, so dass bei allen Folgearbeiten die ebene Trigonometrie angewendet werden kann. Das System wird in der dritten Dimension durch Ellipsoid- oder Meereshöhen ergänzt. Nachteilig ist wegen der auftretenden Verzerrungen die begrenzte Größe des Anwendungsgebietes. Diese können jedoch mit entsprechenden Korrekturgliedern ja nach Genauigkeitsanforderungen ermittelt werden. Die Anwendung solcher Systeme ist die Regel für lokale Vermessungen und GIS.

Daneben gibt es *Sondersysteme*, wie beispielsweise *lokale zweidimensionale Koordinaten* (Lagekoordinaten für ein begrenztes Objekt) oder *zweidimensionale Rechnerkoordinaten* (z. B. aus Digitalisierungen eines Projektes). In der Praxis erfolgt die Abbildung der Erde meist noch nach Lage (2D-Grundriss) und Höhe (1D-Relief) getrennt, die wichtigsten Gründe hierfür sind:

- terrestrische Lage- und Höhenmessungen beruhen auf verschiedenen Messverfahren,
- es werden unterschiedliche Referenzflächen verwendet (Lage = Ellipsoid, Höhe = Geoid)
- je nach Anwendung wird der Lage- und Höhentransformation eine unterschiedliche Bedeutung beigemessen, das hat Auswirkungen auf die nötige Datendichte und Aufnahme Genauigkeit,
- eine vollständige 3D-Erfassung und Modellierung war bisher sehr aufwendig. Moderne Messverfahren liefern zunehmend direkt 3D-Daten, so dass die dreidimensionale Modellierung von Geoobjekten an Bedeutung zunehmen wird (z.B. Satellitennavigation oder Fernerkundung).

Bezugssysteme		Datum und Bezugsfläche		Koordinatentyp
Lage	Amtl. Bayer. GK-Koord.	DHDN, Rauenberg	Bessel	eben/konform
	Bayer. Soldner-Koord.	Frauenkirche München	Laplace, Kugel	Sphärisch
	UTM	ED50	Hayford	eben/konform
	GPS-Koordinaten	WGS84/ETRS89	WGS84/GRS80	3D kartesisch
Höhe	Meereshöhen	Pegel Amsterdam	Quasigeoid	Normalhöhe
	Ellipsoidhöhen	Referenzellipsoid		Normalabstand zu Ellipsoid

Tabelle 2-4: Geodätische Bezugssysteme

Die geplanten oder teilweise schon existierenden amtlichen Koordinatensysteme basieren u. a. auf der Beobachtung künstlicher Erdsatelliten, die sich auf ein globales Referenzsystem beziehen. Unter einem **Referenzsystem** wird hierbei die konzeptionelle Idee eines Koordinatensystems bezüglich seiner Anlage und seiner mathematischen Beschreibung verstanden. Der in diesem Zusammenhang ebenfalls verwendete Begriff des **Referenzframes** stellt die Realisierung der Idee durch ausgeführte Beobachtungen und durch Punkte, die durch Koordinaten das Referenzsystem repräsentieren, dar. Wie u. a. in [ROTHACHER et al. 2000] und [ENGELHARDT et al. 1995] ausführlich erläutert, wird die Verknüpfung der Referenzsysteme von einem globalen, erdfesten ITRS (International Terrestrial Reference System) bis zu Punkten lokaler Netze durch eine stufenweise Verdichtung erreicht. In Deutschland handelt es sich hierbei um das 1991 beobachtete und im Europäischen Referenznetzes (EUREF) eingehängte Deutsche Referenznetz (DREF). Auf Grund der temporalen Bewegung von regionalen Stationskoordinaten gegenüber dem globalen Referenzrahmen beziehen sich die Punktkoordinaten auf das ETRS89 (European Terrestrial Reference System), das auf der Basis der ITRS-Realisierung ITRF89 zu der Epoche 1989 und in Bezug auf

das Referenzellipsoid GRS80 definiert wurde. Das GRS80-Ellipsoid stimmt bis auf wenige Millimeter mit dem WGS84 überein. Im Jahr 1991 hat die Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Vermessungsverwaltungen beschlossen, das ETRS89 als neues, einheitliches, amtliches Koordinatensystem für alle Aufgabengebiete des Vermessungs- und Katasterwesens in Deutschland schrittweise einzuführen. Damit soll den Anforderungen aus der heutigen Praxis entsprochen werden, die eine problemlose länderübergreifende Nutzung von Geodaten (regional, national, international) ohne aufwendige Transformationen zwischen verschiedenen Bezugssystemen erfordern. Es löst das in den jeweiligen Bundesländern aktuelle, amtliche Koordinatensystem ab. In Bayern ist dies das amtliche bayerische Gauß-Krüger-Koordinatensystem, das somit neben dem ETRS89 die Grundlage für die in dieser Arbeit behandelten Applikationen bildet und eines von mehreren in Bayern verwendeten Bezugssystemen darstellt (s. Tabelle 2-4).

2.1.5. Amtliches Koordinatensystem Bayern

Dem amtlichen Bayerischen Koordinatensystem liegt die ebene konforme Abbildung nach C. F. Gauß zugrunde. Sie wurde von Gauß im Rahmen der Hannoverschen Landesvermessung zwischen 1820 und 1830 entwickelt und später von Krüger überarbeitet und veröffentlicht, so dass man sie als Gauß-Krüger-Abbildung bezeichnet. Bei dieser Abbildung werden die geodätischen Koordinaten (B, L) auf einem Ellipsoid konform (winkeltreu im Differenziellen) in ein ebenes kartesisches Koordinatensystem (x, y) abgebildet, wobei

- der Schnittpunkt des durch das abzubildende Gebiet verlaufende Bezugsmeridians (Hauptmeridian) mit dem Äquator die ebenen Koordinaten $(x, y) = (0, 0)$ erhält
- das Bild des Hauptmeridians eine Gerade ergibt, die die Abszissenachse (x) des Systems bildet
- die Länge auf der Abszissenachse zum entsprechenden Bogen des Hauptmeridians in einem konstanten Verhältnis steht.

Durch die Abbildung des Ellipsoids in die Ebene ergeben sich Verzerrungen, die sich auf Längen, Flächen und Richtungen auswirken. Die Richtungsverzerrung ist bei der Gauß-Krüger-Abbildung wegen der Konformität so geringfügig, dass sie in der Praxis fast immer vernachlässigt werden kann. Die Verzerrungen von Längen und Flächen können mittels Reduktionsformeln berechnet werden:

Die Längenreduktion zwischen gemessener Strecke S und aus Koordinaten gerechneter Strecke s beträgt näherungsweise:

$$\Delta S = s - S = \frac{y_m^2}{2R_m^2} \cdot S \quad (\text{Gl. 2-1})$$

Die Flächenreduktion zwischen Feldfläche F und aus Koordinaten gerechneter Fläche f beträgt näherungsweise:

$$\Delta F = f - F = \frac{y_m^2}{2R_m^2} \cdot F \quad (\text{Gl. 2-2})$$

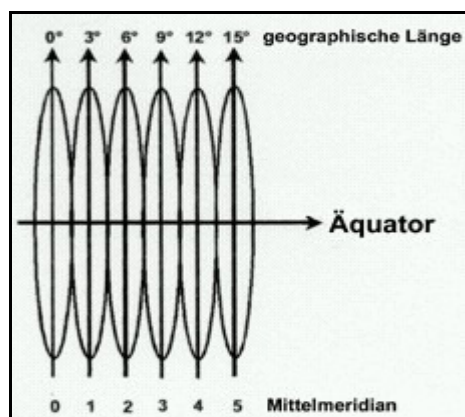


Abbildung 2-11: GK-Meridianstreifensystem

Wegen der stark zunehmenden Längenverzerrung mit wachsendem Abstand (y) vom Hauptmeridian werden Gauß-Krüger-Meridianstreifensysteme von je 3° Längenunterschied gebildet. In Bayern wird jedoch seit Einführung der Basisgeoinformationssysteme der Vermessungsverwaltung das gesamte Staatsgebiet einheitlich im 4. Meridianstreifen (Hauptmeridian $L_0=12^\circ$ -Ost) abgebildet. Der Abstand (y) vom Hauptmeridian beträgt in Bayern maximal etwa 220 km. Bei $y = 200$ km und $R = 6370$ km ergibt sich ein Wert $\Delta S \sim 0.5$ m für eine Strecke von 1 km und $\Delta F \sim 0.1$ ha für eine Fläche von 1 km^2 . Diese Beträge können in topographischen Geoinformationssystemen vernachlässigt werden.

2.1.6. Soldner Koordinatensystem

Bei der Berechnung der Bayerischen Landesvermessung im 19. Jahrhundert durch J. G. Soldner lag der Gedanke zu Grunde, durch die Einführung einer für das betrachtete Gebiet möglichst gut an das globale Ellipsoid angepassten Berührkugel alle Berechnung sphärisch und mit relativ geringen Fehlern ausführen zu können. Gleichzeitig wurde ein System von einander, sich rechtwinklig schneidender Parallelkoordinaten mit metrischen Einheiten (statt Winkleinheiten) auf dieser Kugel eingeführt und diese im Maßstab 1:1 in ein ebenes, rechtwinkliges Koordinatensystem übertragen (Soldner'sche Abbildung). Die Kugel mit $R = 6388172$ m wurde so gelagert, dass der Parallellkreis durch den Bezugspunkt auf Kugel und Ellipsoid gleich groß sind. Als Bezugspunkt wählte Soldner den nördlichen

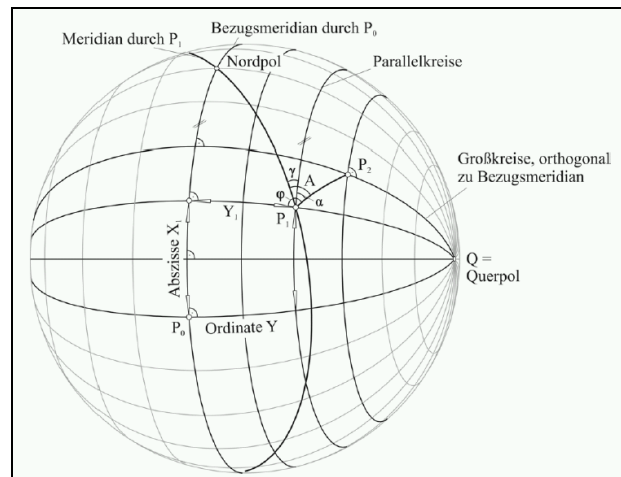


Abbildung 2-12: Soldner Berührkugel [RUMMEL 2005]

Turm der Frauenkirche in München. Die Abszissenachse X ist der Meridian durch den Bezugspunkt P_0 , die Ordinatenachsen Y bilden Großkreise durch die Punkte senkrecht zur Abszissenachse. Dabei werden der Bezugsmeridian und die Ordinatenlinien längentreu wiedergegeben, während die ellipsoidischen Abszissenunterschiede mit zunehmender Entfernung vom Hauptmeridian durch die Verjüngung der Parallelkreise zum Querspol hin immer stärker gedehnt werden. Um diesen Einfluss gering zu halten, wurden die darauf basierenden Kartenwerke in ihrer räumlichen Ausdehnung begrenzt. In Bayern ist das Soldner Koordinatensystem stellenweise noch in Gebrauch bzw. alte Datenbestände beziehen sich darauf. So legt beispielsweise die Bayerische Staatsforstverwaltung die Inventurpunkte für die Forstinventur in „Bayernkoordinaten“ fest, bei denen es sich um modifizierte Soldnerkoordinaten handelt (s. Kap. 4.5.3).

2.1.7. Höhensysteme in Bayern

In Deutschland, und somit auch in Bayern, stellt das Deutsche Haupthöhennetz 1992 (DHHN 92) das aktuelle, amtliche Nivellementsnetz 1. Ordnung dar. Es verwendet *Normalhöhen* H^N , die unter Einbeziehung von Schweremessungen (geopotentielle Kote) und eines definierten Normalschwerefeldes (nach Molodenski) abgeleitet werden [TORGE 1991]. Normalhöhen beziehen sich nicht wie die in der Schweiz und in Österreich verwendeten, rein auf die Erdschwere bezogenen *orthometrischen Höhen* H^O auf das Geoid, sondern auf das sog. Quasigeoid. Es stellt keine Niveaufläche dar und entsteht, wenn man für alle Punkte der Erdoberfläche ihre Normalhöhe auf ihren Lotlinien entlang nach unten abträgt (s. Abb 2-7). Der Unterschied zwischen Geoid und Quasigeoid ist gering (mm bis wenige cm). Die Undulationen des Quasigeoids werden als Höhenanomalien ξ bezeichnet. Sie stellen den Höhenunterschied zwischen dem Quasigeoid und dem Referenzellipsoid dar und hängen von dessen Lagerung und Dimension ab. Dabei kann nach [LELGEMANN 1999] zwischen relativen Höhenanomalien, die sich auf das lokal bestanschließende Ellipsoid beziehen, und den in Bezug auf das geozentrisch gelagerte Referenzellipsoid GRS80 des ETRS89 definierten absoluten Höhenanomalien unterschieden werden. Der Zusammenhang zwischen den aus GPS-Messungen unter Berücksichtigung eines Datumüberganges zum amtlichen, lokalen Ellipsoid (Besselellipsoid) abgeleiteten ellipsoidischen Höhen h_B und den amtlichen Höhen des DHHN 92 ergibt sich daher zu $h_{\text{Bessel}} = H^N - \xi_{\text{Bessel}}$. In Bayern nehmen die absoluten Höhenanomalien Beträge zwischen 45 und 48 Metern an, während sich die relativen Höhenanomalien zwischen -1 und -6 m bewegen. Vor der Einführung des DHHN 92 galten in Bayern die *normalorthometrischen (sphäroidischen) Höhen* H^{NO} des DHHN 12, die sich auf die Niveaufläche, die durch den Normal-Nullpunkt (Amsterdamer Pegel) geht, beziehen und bei denen der Anteil der gemessenen Schwere durch eine Modell- oder Normalschwere ersetzt wird. Im Gegensatz zu den Höhen über Normalhöhennull (NHN) liegen die Höhen über Normal-Null (NN) des DHHN 12 in Bayern auch für untere Ordnungsstufen des Höhenfestpunktfeldes (und damit flächendeckend) vor und werden daher noch häufig in der Praxis verwendet. Der Unterschiede zwischen den verschiedenen physikalisch definierten metrischen Höhen ist im Flachland gering und bewegt sich im Hochgebirge in der Größenordnung von einigen dm, so dass je nach Genauigkeitsanforderungen der Zielapplikation auf die Berücksichtigung der exakten Höhendefinitionen verzichtet werden kann. Für weitere Details zu den Definitionen und der Umrechnung zwischen den Systemen siehe z. B. [RUMMEL 2000].

2.2. Mobile Computing

Im Zusammenhang mit mobilen, raumbezogenen Informationssystemen wird häufig der Begriff des „Mobile Computing“ für unterschiedliche Sachverhalte oder Konzepte verwendet. Daher soll in diesem Kapitel kurz auf die Bedeutung und die damit verbundenen Begriffe etwas näher eingegangen werden.

Mobile Computing ist der Oberbegriff für die Anwendungen tragbarer Computer innerhalb eines größeren Datenverbundes, deren technologische Basis durch die Entwicklungen und das Zusammenspiel von Computer- und Kommunikationstechnologie gebildet wird [NIEMEIER 1994]. Es ermöglicht den Menschen die Mobilität, die sie sich heute sowohl im beruflichen als auch im privaten Bereich wünschen. Vor allem neue Entwicklungen auf dem Gebiet der drahtlosen Netzwerke kommen diesen Bedürfnissen zunehmend entgegen. Die Miniaturisierung der Endgeräte und die weltweite Vernetzung ermöglichen heute Dienste, die noch vor Jahren undenkbar waren. Der flächendeckende Ausbau von immer leistungsstärkeren Mobilfunknetzen ist nur ein Beispiel für diese Entwicklung. Nach [ROTH 2002] stellt Mobile Computing daher heute ein Forschungsgebiet dar, das sich sowohl mit Fragen der Kommunikation von Benutzern als auch mit mobilen Endgeräten und den zugehörigen Anwendungen befasst. Die im Kontext von Mobile Computing verwendeten Begriffe können hierbei in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- ☞ Begriffe aus Benutzersicht
- ☞ Begriffe aus Sicht der Netzwerke

Die beiden folgenden Tabellen fassen die wichtigsten Begriffe zusammen und beschreiben die damit verbundenen Konzepte aus der jeweiligen Sichtweise.

Benutzersicht	
<i>Allgegenwärtige Computer</i>	
Ubiquitous Computing UbiComp	Ein von Mark Weiser 1991 eingeführter Begriff, der die dritte Phase der Computernutzung beschreibt. Sie schliesst sich an die Phase der Mainframes und PC's an und ist geprägt von kleinen, weltweit vernetzten Systemen, die entweder stationär oder mobil eingesetzt werden können, und ein sehr persönliches Verhältnis zwischen Mensch und Maschine besteht.
Calm Computing Invisible Computing Disappearing Computing	Ein Teilaspekt der o. g. Vision ist, dass Computer nicht mehr die volle Aufmerksamkeit des Benutzers beanspruchen, sie treten vielmehr in den Hintergrund. So sollen Alltagsgegenstände Rechnerfunktionen übernehmen (z. B. Kugelschreiber).
<i>Nomadic Computing</i>	
Nomadic Computing	Hier liegt der Schwerpunkt auf der Mobilität des Anwenders, während Mobile Computing auch Vorgänge nach der Ankunft am Zielort beinhaltet.
Personal Computing	Drückt den stärkeren „persönlichen“ Charakter mobiler Endgeräte aus (z. B. Organizer beinhalten persönliche Termine, private Telefonnummern)
Tragbare Computer Handheld Computer Palm Computing Wearable Computing	Drückt die physische Mobilität der Endgeräte aus. Handheld Computer oder Palm Computing sind Geräte, die in eine Hand passen. Werden mobile Endgeräte direkt am Körper getragen, z.B. als Armbänder, Gürtel oder Brillen, so spricht man von Wearable Computing.

Tabelle 2-5: Mobile Computing Begriffe aus Benutzersicht

Netzwerksicht	
<i>Ad-hoc und mobile Vernetzung</i>	
Ad-hoc Vernetzung Spontane Vernetzung	Steht für eine kurzfristige Vernetzung von Geräten ohne aufwendige Konfiguration, die im strengen Sinn nur die Vernetzung mobiler Rechner untereinander und nicht mit einem stationärem Netz (z. B. Internet) beschreibt.
Mobile Vernetzung	Vernetzung mobiler Rechner mit einem stationären Netzwerk.
<i>Embedded Networking</i>	
Embedded Systems Embedded Networking	Embedded Systems sind kleine Rechner zu Steuerungs- und Kontrollzwecken, die in andere Elektrogeräte und in die Vernetzung integriert werden können.
Drahtlose Kommunikation	Beschreibt die Art der Anbindung eines mobilen Gerätes über kabellose Techniken, nicht deren Bewegungszustand (kann auch stationär sein).

Tabelle 2-6: Mobile Computing Begriffe aus Netzwerksicht

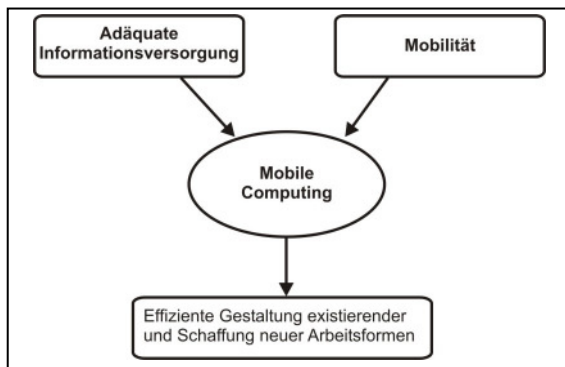


Abbildung 2-13: Ortsungebundene Informationsnutzung

Die Konzepte des Mobile Computing können auch auf die Bereiche Geodäsie und Geoinformation angewendet werden. Dabei verbindet das Mobile Computing eine adäquate (Geo-) Informationsversorgung mit der Mobilität des Nutzers, um existierende Arbeitsvorgänge effizienter zu gestalten oder neue Arbeitsformen zu schaffen. Das Mobile Computing erlaubt somit dem Anwender, die Informationstechnologie ortsungebunden zu nutzen, und kann nach [WILTSCHKO 1999] in stand-alone und bereichsübergreifende Anwendungen eingeteilt werden.

Stand-alone Anwendungen stellen eine Insellösung dar, bei der nur ein begrenzter persönlicher Datenbestand, der für die Erledigung der anstehenden Aufgabe erforderlich ist, auf den tragbaren Rechner übernommen wird. Während der Bearbeitung ist keine Kommunikation mit dem Informationssystem notwendig, denn der Datenaustausch zwischen mobilem Rechner und dem zentralen IS findet nach Abschluss der Arbeiten statt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der durchgängigen digitalen Datenverarbeitung, die Eingabekontrollen durch elektronische Formulare und die Aufdeckung grober Aufnahmefehler durch sofortige Ergebnisdarstellung ermöglicht. Insgesamt zeichnen sich diese Anwendungen durch einfache und problemangepasste Systeme aus. Komplexere Systeme werden i. d. R. nicht unterstützt.

Charakteristisch für bereichsübergreifende Anwendungen ist die Integration der Feldeinheit in ein Informationssystem unter Wahrung der Mobilität. Dadurch erhöhen sich die Anforderungen an die Kommunikation und die einzusetzende Hard- und Software. Der Vorteil liegt in einer verbesserten Informationsqualität (Vollständigkeit, Korrektheit, Aktualität usw.), da der Anwender umfangreich im Sinne eines „intelligenten Assistenten“ bei seiner Arbeit unterstützt wird. Außerdem kann durch die Möglichkeiten einer verteilten Projektbearbeitung eine schnellere Verfügbarkeit der Informationen gewährleistet werden.

2.3. Begriffe und Varianten mobiler raumbezogener Informationssysteme

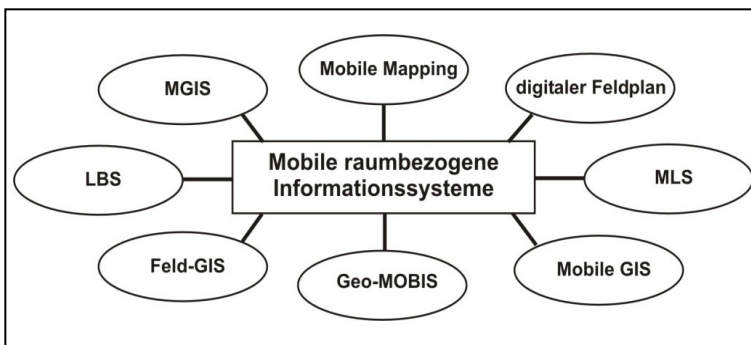


Abbildung 2-14: Begriffe mobiler raumbezogener Informationssysteme

Der Thematik der mobilen raumbezogenen Informationssysteme (MOBRIS) kann man sich von verschiedenen Seiten nähern. Von der Hardwareseite, dem übergeordneten Informationssystem oder von der Anwendung her. Dadurch haben sich in den letzten Jahren sehr viele unterschiedliche Begriffe gebildet, die aber letztendlich Systeme mit identischen oder ähnlichen Zielsetzungen beschreiben (s. Abb. 2-13).

Diese liegen, wie bereits im Kap. 1.2 ausgeführt, in der mobilen Auskunft, Erfassung oder Fortführung von raumbezogenen Informationen. Daher können nach [INGENSAND 2002] mobile raumbezogene Informationssysteme von der Anwendungsseite her auch in passive und aktive MOBRIS unterteilt werden. Bei passiven MOBRIS nutzt der Anwender nur Informationen während aktive Systeme die Möglichkeiten bieten, diese auch selber zu erfassen oder zu bearbeiten. Indirekt ergibt sich damit der Expertenlevel eines Anwenders als weiteres Unterscheidungsmerkmal. Der Spezialist wird ein System mit komplexer Nutzerführung, Funktionalität und Datenmanipulation bedienen können, während der „allgemeine“ Anwender erwartet, dass das System möglichst verständlich mit ihm kommuniziert. Ebenso ist zu differenzieren, ob die Systeme von einem Menschen an dem Körper getragen oder in Land- oder Luftfahrzeugen eingesetzt werden. Die fahrzeuggestützten Systeme haben im Prinzip die gleichen Elemente wie die von Menschen getragenen MOBRIS, besitzen aber den Vorteil, ausreichend mit Energie versorgt zu sein.

Weitere Möglichkeiten zur Begriffsdefinition ergeben sich durch das Zusammenspiel der drei Kerntechnologien *mobile Endgeräte*, *GIS* und *Internet*. Durch sie entstehen spezielle Applikationstechnologien, die je nach Technologieschwerpunkt (oder auch subjektiven Empfinden) mit zutreffenden Begriffen versehen werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 2-14 gegeben, in dem die sog. *Location Based Services* (LBS) und *Mobile Location Services* (MLS) in der Schnittmenge dieser drei Kerntechnologien liegen. Unter LBS werden ortsbezogene Dienste verstanden, die raumrelevante Informationen für eine mobile Beauskunftung unter Berücksichtigung der aktuellen Position des Anwenders und der Nutzung des Internets als Kommunikationsplattform bereitstellen (s. Kap. 2.3.3). Eine Geodatenerfassung oder -fortführung ist nicht Ziel von LBS-Diensten. Die *Mobile Location Services* bieten nach [BALDEGGER 2002] ebenfalls Zugang zu auf den Anwender maßgeschneiderten Informationen über mobile Endgeräte und Internet. Die Informationen haben einen Raumbezug, müssen aber im Unterschied zu LBS nicht mit dem Standort des Nutzers (Position) zusammenhängen. Beispiele für MLS über das Internet sind die online Stadtplan-Dienste mit *Lokalisation* durch Nutzereingabe, d.h. einer Ortsbestimmung unter Berücksichtigung von Umgebungsinformationen. Bei den anderen drei aufgeführten Applikationstechnologien liegt der Schwerpunkt hingegen verstärkt nur auf zwei Kerntechnologien, wobei dies nicht zwangsläufig die Nutzung der dritten Technologie ausschließt:

- *Mobile GIS* bieten alle notwendigen GIS-Funktionen für die Auskunft, Erfassung und Fortführung von raumbezogenen Informationen auf mobilen Endgeräten an. Die Nutzung der Internet-technologie ist für die Bearbeitung von Teilaufgaben zusätzlich möglich.
- *Internet GIS* (oder auch *Web GIS*) bezeichnet eine spezielle Client/Server-Technologie, die einen mehrfachen Nutzer-Zugriff auf ein GIS über das Internet via Browser ermöglicht. Je nach verwendeter Technologie stehen entweder Raster- und/oder Vektorkarten, Sachdaten sowie ein unterschiedliches Angebot an GIS-Funktionalität mobil zur Verfügung.
- Unter den Begriff *mobiles Internet* fallen alle Anwendungen auf mobilen Endgeräten, die es dem Nutzer erlauben, unter Berücksichtigung der vorhandenen Kapazitäten der mobilen Datenkommunikation Informationen unterschiedlichen Typs aus dem Internet vor Ort zu verarbeiten.

Die Bedeutung des Raumbezuges bei MOBRIS, und damit auch in der Begriffsbestimmung, wird anhand von LBS und MLS deutlich. Bei diesen Anwendungen kann der Ortsbezug als Informationsfilter genutzt werden, als weitere Stufe der Personalisierung und als Entscheidungshilfe. Er stellt nach [GRAUL 2002] und [LADSTÄTTER 2002] somit eines von drei Elementen dar, die bei der mobilen Abfrage von raumbezogenen Informationen von zentraler Bedeutung sind:

1. Inhalte = Abfrage von für den Benutzer interessanten Informationen in geeigneter Form
2. Zeit = Zeitpunkt oder Zeitraum, für den Informationen relevant sind
3. Raum = unmittelbare Umgebung eines Aufenthaltsortes oder Standort von Objekten

Der Raum als Informationsfilter liefert ausschließlich relevante Informationen zu einem bestimmten Aufenthaltsort, die zu einem bestimmten Zeitpunkt Gültigkeit besitzen. Die Berücksichtigung des Raumes stellt daher eine 3. Dimension der Information dar (s. Abb. 2-15) und erhöht die Bedeutung von ausreichend genauen sowie zuverlässigen (sensorgestützten) Ortungs- und Lokalisierungstechnologien.

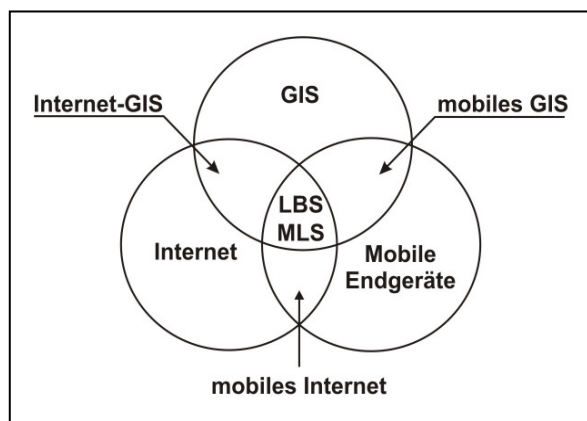


Abbildung 2-15: Kern- und Applikationstechnologien MOBRIS

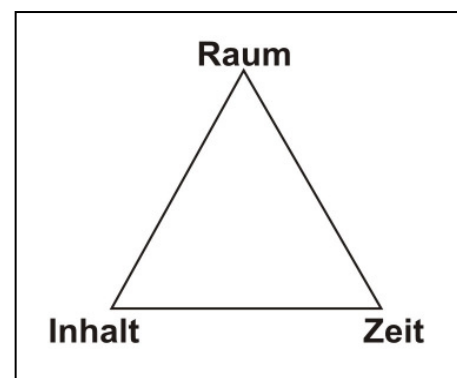


Abbildung 2-16: Raum als Informationsfilter

2.3.1. Elektronische Feldbücher, digitaler Feldplan, CAF und mobile GIS

Die Entwicklung der Geodatenerfassung in den letzten Jahrzehnten ist in Abbildung 2-16 dargestellt und kann mit den Stichworten „vom Messstisch, über Computer Aided Field Work (CAF) zu mobilen GIS“ beschrieben werden. Betrachtet man dabei die historischen Wurzeln der Geodäsie genauer, so stellt man fest, dass der Messtisch schon damals Eigenschaften aufwies, die heute im Zeitalter von zusammenwachsenden Märkten und steigender Produktivität sehr aktuell sind und auch genutzt werden [LÜTHI, ZGRAGGEN 1996]. So können bei diesem Messverfahren die Koordinaten mit analogen Messmitteln „in Echtzeit“ bestimmt und mit den zugehörigen graphischen und thematischen Attributen verknüpft werden, wodurch eine Kontrolle aller Einträge und eine Plausibilitätsprüfung unmittelbar im Felde möglich war. Auch die graphischen Elemente waren sofort auf Vollständigkeit überprüfbar, das Produkt (=Kartierung) schon fast fertig. Allerdings fehlte ihnen die heute unverzichtbare Eigenschaft der digitalen Verfügbarkeit. Dieser Nachteil konnte im Zuge der Einführung digitaler Messtechniken für ein CAF beseitigt werden [SCHLUCHTER 1998], allerdings zuerst nur unter Aufgabe der „Online-Kartierung“. Der geschlossene, digitale Datenfluss vom Feld zum Büro war nur mit der Methode der numerischen Punktcode-, Attribut- und Verbindungsinformationsvergabe am elektronischen Tachymeter oder digitalem Speichermedium im Feld möglich. Als dann Anfang der 90er Jahre die ersten tragbaren, mit einem Stift bedienbaren Computer, sog. Pen-Computer, auf den Markt kamen, wurde für Geodäten, Kartographen, Geographen und andere Disziplinen die Vision realisierbar, auf einem „elektronischen Zeichentisch bzw. Messtisch“ in gewohnter Skizzen- und Notizform zu arbeiten. Diese Verknüpfung zwischen bewährten, analogen Methoden und moderner digitaler Technologien schlägt sich auch in der Begriffsfindung für mobile raumbezogene Informationssysteme wieder, wie beispielsweise beim digitalen Feldplan [HELM 1998]. Dieser erlaubt die sukzessive Geometrisierung einer vorab erstellten, graphischen Freihandskizze durch die erfassten Messpunkte direkt vor Ort, wodurch zum einen die Kontrollfunktion gegeben als auch ein effizientes Arbeiten durch skizzenorientierte Objektbildung ohne Konstruktionszwänge möglich ist. Im Geo-Bereich stellen daher folgende Technologien Ausgangspunkte für die heutigen Systeme dar:

- ☞ die digitale Feldskizze oder Feldplan
- ☞ das elektronische Feldbuch
- ☞ der elektronische oder digitale Messtisch
- ☞ die digitale Karte mit GPS-Position

Sie zeichneten sich durch eine stark CAD orientierte Objekterfassung mit digitaler Messwertverwaltung aus und verwendeten in der Regel keine Datenbank zur Objektverwaltung auf Basis eines Objektmodells. Die wenigen datenbankbasierten und oft als mobiles GIS bezeichneten Systeme boten wiederum nur eingeschränkte Möglichkeiten einer sensorgestützten Objekterfassung. Daher ist noch ein weiterer Schritt hin zu einem sensorgestütztem mobilen GIS notwendig, um der oben genannten und hinsichtlich der Aspekte einer mobilen sowie sensorgestützten Geodatenverarbeitung erweiterten Definition zu genügen:

Ein **mobiles GIS** besteht aus **mobilen Endgeräten** mit:

- einer geographischen Datenbank, in deren Datenbasen die Modelle raumbedeutsamer Strukturen einer bestimmten Region dokumentiert sind
- Verfahren und Methoden, in denen die Modelldaten erfasst, aktualisiert, präsentiert, assoziiert und analysiert werden können
- Schnittstellen für die Integration und die Kommunikation mit **Sensoren** und anderen EDV-Systemen

Die Basis bildet ein einheitliches räumliches Bezugssystem, das die eindeutige geographische Zuordnung fachübergreifende Verknüpfung der raumbezogenen Daten ermöglicht.

Heute wird der Begriff „mobiles GIS“ oft als Oberbegriff für verschiedene MOBRIS verwendet. Darunter fallen auch oft Systeme mit eingeschränkter oder gar nicht vorhandener GIS –Funktionalität, so dass auf den ersten Blick eine klare Trennung zwischen den verwendeten Begriffe häufig nicht gegeben ist.

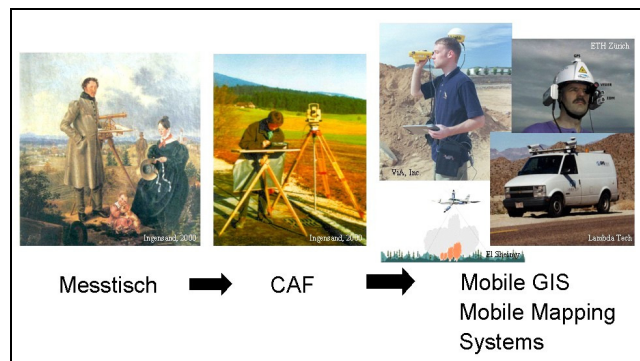


Abbildung 2-17: Entwicklung mobiler GIS

2.3.2. Mobile Mapping Systeme

Der Begriff der *Mobile Mapping Systems (MMS)* wird hauptsächlich im englischsprachigen Raum verwendet und steht für ein mobiles raumbezogenes Informationssystem dessen Schwerpunkt auf der mobilen Geodatenerfassung liegt. Allerdings ist auch hier die Trennung zu dem im deutschsprachigen Raum favorisierten Begriff *mobiles GIS* nicht immer eindeutig gegeben, so dass es zu Überschneidungen kommen kann. Das Ziel von MMS ist es, die traditionellen, meist kostenintensiven und rein punktförmigen Erfassungsmethoden mit elektronischem Tachymeter oder GPS durch flächenhafte, kinematische und echtzeitfähige Aufnahmeverfahren effizienter und vor allem zuverlässiger zu gestalten. Gerade die Unabhängigkeit der Positionierung von den Umgebungsbedingungen (Stadt, Wald, Gebirge etc.) ist ein wesentliches Merkmal von Mobile Mapping Systemen. Um diese Zielsetzungen zu erreichen, werden Sensoren für die Navigation (z. B. GPS, Magnetometer, Beschleunigungssensoren, Gyroskope) mit denen für eine automatische, berührungslose Objektaufnahme (z. B. Video- oder CCD-Kamera, Laserscanner) auf einer gemeinsamen, luft- oder landgestützten Plattform kombiniert und über eine einheitliche Zeitbasis synchronisiert [BENNING, AUSSEMS 1998]. Die Registrierung und automatische Auswertung erfolgt auf einer zentralen Recheneinheit unter Einsatz komplexer Navigationsalgorithmen und Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Nach [TAO, EL-SHEIMY 2000] ergeben sich dadurch folgende Vorteile von MMS:

- Reduzierung von Zeitaufwand und Kosten bei den Feldaufnahmen
- zeitgleiche Aufnahme von attributiven und metrischen Informationen aller Objekte im Messraum
- Archivierung ermöglicht wiederholte Auswertung zusätzlicher Objekte ohne erneute Aufnahme.

Die Abbildung 2-17 zeigt drei aktuelle Beispiele für MMS aus den Bereichen Straßenraumvermessung [MOSES 2003], Erzeugung von 3D-Stadtmodellen [GEODATA 2004] und automatischer Detektion von Waldbränden [WRIGHT 2004] mit denen sich absolute Objektgenauigkeiten von einem bis wenige dm erreichen lassen. Eine Einführung in die verwendeten Technologien und Methoden sowie einen guten Überblick über bisher entwickelte landgestützte MMS gibt [ELLLUM, EL-SHEIMY 2002].



Abbildung 2-18: Anwendungsbeispiele von Mobile Mapping Systems

Obwohl MMS schon seit Anfang der 90er Jahre entwickelt werden, haben sie bisher in der geodätischen Praxis wenig Bedeutung erlangt. Die Gründe hierfür liegen in den sehr hohen Systemkosten und der hohen Komplexität. Außerdem konnten wegen fehlender Miniaturisierung, Problemen in der Energieversorgung und geringer Signalstabilität der Sensoren für die Trägheitsnavigation bisher Mobile Mapping Systeme nur auf Autos oder in Flugzeugen implementiert werden. Die Realisierung von praxistauglichen und kostengünstigen personenbezogenen Systemen ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten, da hier ein großes Potential an neuen Applikationen liegt (z. B. [EVANS et al. 2003], [LADETTO, MERMINOD 2002], [ELLLUM, EL-SHEIMY 2001]). Diese liegen nicht ausschließlich im Bereich der Geodatenerfassung (Mapping), so dass seit kurzem international auch der etwas verallgemeinerte Begriff der *Multi Sensor Systeme (MSS)* im fachlichen Zusammenhang mit MMS verwendet wird [IAG 2004]. Vor allem der Bedarf an einer zuverlässigen und ausreichend genauen Positionierung für Fußgänger auf Basis von MSS sowohl im Indoor- als auch Outdoor-Bereich wächst stetig an, da diese eine der Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche Realisierung der im folgenden Kapitel beschriebenen ortsbezogenen Dienste ist.

2.3.3. Location Based Services

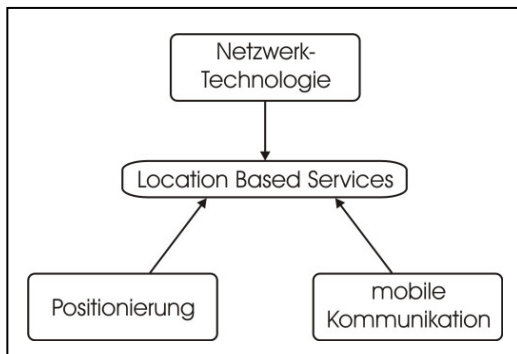


Abbildung 2-19: Einflussfaktoren LBS

Neben vielen anderen Möglichkeiten kann die Bereitstellung von aktuellen und an die Bedürfnisse des Benutzers angepassten, ortsbezogenen Informationen maßgeblich zu seiner Mobilität und Flexibilität beitragen. Beispielsweise sei hier auf einen Außendienstmitarbeiter verwiesen, dessen geplante Route sich durch neue Anforderungen verändert, und der durch gezielte ortsbezogene Information, z.B. aktualisierte Route und Kundendaten, in die Lage versetzt wird flexibel zu reagieren. Diese Arten von Anwendungen werden allgemein als ortsbezogene Dienste bzw. mit dem englischen Begriff Location Based Services (LBS) bezeichnet (u. a. [BROWN 2001], [SMITH et al. 2001]).

Die Entwicklung von LBS wurde maßgeblich durch die Integration der drei Basistechnologien *Computernetzwerk*, *Positionierung* und *mobile Kommunikation* beeinflusst (s. Abb. 2-18). Vor allem die Unternehmen der Mobilfunkbranche treiben seit dem Jahr 2000 die Entwicklung dieser gebührenpflichtigen Dienste voran, um die hierfür notwendige und von ihnen bereitgestellte Übertragungstechnologien zu finanzieren. Durch die Bereitstellung von – auf seine jeweilige Aufgabenstellung bzw. Situation aufbereiteten – Informationen wird im Allgemeinen ein spezifischer Nutzen (Mehrwert) beim Anwender generiert, der besonders durch die Berücksichtigung der aktuellen Position des Nutzers sowie weiterer nutzerspezifischer Parameter (sog. Personalisierung) erreicht wird. LBS können daher nach [KÖLMEL, WIRSING 2002] auch als Spezialisierung des *M-Business* bzw. des *M-Commerce* angesehen werden, die jeweils eine mobile Variante des *E-Business* bzw. *E-Commerce* darstellen. Darunter versteht man eine wirtschaftliche Tätigkeit bzw. eine Handelstransaktion auf der Basis einer elektronischen Verbindung.

Der Aufbau und Betrieb eines LBS erfordert die Zusammenarbeit verschiedener Partner, die gemäß Abb. 2-19 untereinander vernetzt sind. Nach [WUNDERLICH 2003] gehören die Netzbetreiber und Endgerätehersteller zu den zentralen Partnern. Sie müssen in der Lage sein, Infrastruktur und Plattformen bereitzustellen, die rein technisch eine störungsfreie, schnelle Übermittlung und die optimal erkennbare Präsentation der Informationen sicherstellen. Zur ortsbezogenen Selektion bedarf es einer Stelle, welche die Ortungsaufgabe übernimmt (Location Fixing). Diese kann extern, vom Netzbetreiber oder vom Nutzer persönlich übernommen werden, wenn das Gerät mit einer geeigneten Positionierungstechnologie ausgestattet ist. Der informative Inhalt, der nachgefragt wird, muss von einem Anbieter (Content Provider) aktuell vorgehalten werden. Dazu sind Daten, meist verschiedener Natur und aus verschiedenen Quellen, nötig.

In der Auffindung, Zusammenführung und Aufbereitung dieser Daten liegt die informationsgenerierende Wertsteigerung. Dort, wo der Ortsbezug nicht durchgehend vorhanden ist, muss dieser durch einen „Georeferenten“ hergestellt werden. Ein typisches Beispiel dafür ist die Ableitung einer Adresse aus den Positionskordinaten (Reverse Geocoding). Bleiben noch die Abrechnungsstelle für die finanzielle Abwicklung der gebührenpflichtigen Dienste sowie eine Vermittlungs- und Verschlüsselungsplattform (Broker u. Encrypter), die mögliche Bedenken der Nutzer hinsichtlich des Datenschutzes gegenüber den Netzbetreibern und Servicedienstleistern reduzieren soll.

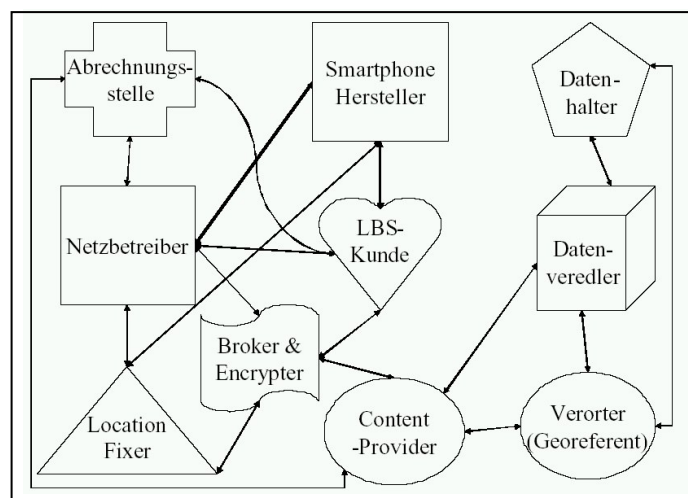


Abbildung 2-20: LBS Partner [WUNDERLICH 2003]

Innerhalb der mobilen, ortsbezogenen Dienste können zwei Anwendungsarten hinsichtlich der Zielgruppe unterschieden werden, die bei der Konzeption eines LBS eine wesentliche Rolle spielen. Dies sind zum einen Dienste, die einem breiten Publikum im Rahmen sog. Business to Consumer Services (B2C) zugänglich gemacht werden sollen und zum anderen reine Unternehmenslösungen in Form von Business to Business Services (B2B). So ist beispielsweise im ersten Fall darauf zu achten, dass der Dienst von möglichst vielen Personen genutzt werden kann, ohne dass sich diese ein spezielles Endgerät anschaffen müssen. Daher werden in dieser Zielgruppe z. Zt. vor allem Mobiltelefone, Kleinrechner in Form von Personal Digital Assistants (PDA) oder eine Kombination aus beidem (sog. Smartphones) verwendet.

Die Einteilung ortsbezogener Dienste in geeignete Kategorien kann je nach Blickwinkel und Zweck völlig unterschiedlich sein. Eine Kategorisierung nach Thematik ist jedoch im Hinblick auf die Bedeutung von *Inhalten*, die zu Beginn des Kapitels 2.3 als eines der drei zentralen Elemente bei der Abfrage von raumbezogenen Informationen definiert wurden, sinnvoll. Demnach können LBS in die folgenden vier thematischen Bereiche untergliedert werden:

- Sicherheitsbezogene LBS (*Safety*):
Notfall- und Notrufdienste, Informationen über Werkstätten
- Gebührenbezogene LBS (*Billing* bzw. *Location Sensitive Billing*):
Unterschiedliche Tarife an verschiedenen Standorten, z. B. zu Hause oder Büro
- Informationsbezogene LBS (*Location Based Information Services*):
Informationen über bestimmte Lokalitäten, Veranstaltungen, Verkehr etc.
- Lokalisationsbezogene LBS (*Tracking*):
Lokalisierung und Management von Menschen oder Objekten (*People* oder *Asset Tracking*)

Unabhängig von der zu erreichenden Zielgruppe basieren ortsbezogene Dienste aus technologischer Sicht auf mehreren Hauptkomponenten innerhalb einer Client/Server Architektur. Hierzu zählen die folgenden, in der Abbildung 2-20 dargestellten und in Kapitel 3 näher beschriebenen Komponenten:

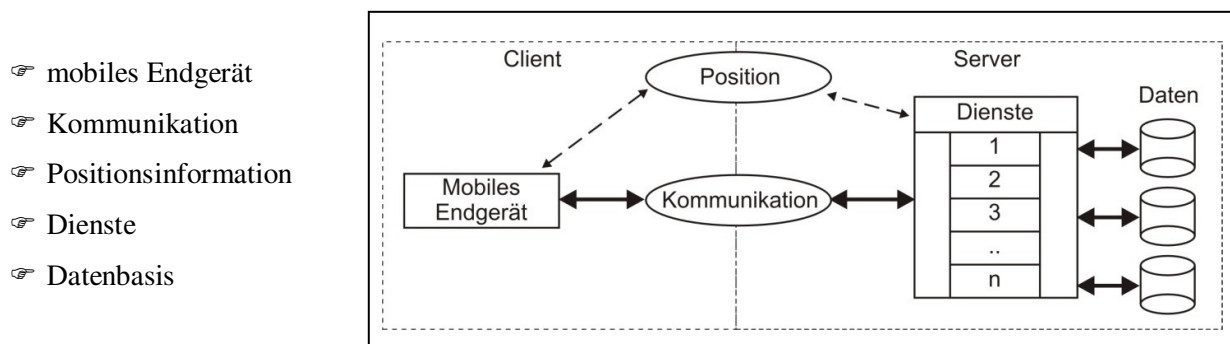


Abbildung 2-21: Hauptkomponenten LBS

Wie bereits in Kapitel 2.1 ausgeführt, stellen LBS kein GIS im eigentlichen Sinne dar, obgleich sie GIS-Funktionalität aufweisen (z. B. Funktionen für Ortung, Geocodierung, Kartenvisualisierung, Tourenplanung). Diese werden im Hintergrund von GIS-Diensten bereitgestellt. Es liegt auf der Hand, dass sich bei dieser Art von Diensten die Positionierungs- bzw. Lokalisierungstechnologie und der Inhalt (Content) am stärksten gegenseitig beeinflussen. Je genauer die Positionsinformationen vorliegen, desto hochauflösender können die verwendeten Daten sein. Daher verlangen die verschiedenen Typen von ortsbezogenen Diensten nach unterschiedlichen Positionsgenauigkeiten, die in der Regel zwischen 5m – 200m liegen. Aber gerade im höheren Genauigkeitsbereich von < 10 – 20 m steht noch keine ausreichend zuverlässige Ortungstechnologie zur Verfügung, die auch unter schwierigen oder wechselnden Empfangsbedingungen (Indoor/Outdoor) die gewünschten Genauigkeiten liefert. Deshalb werden bei Umfragen über die wesentlichen Restriktionen für einen erfolgreichen Einsatz von ortsbezogenen Diensten neben niedrigen Kosten, einfaches Roaming, Datenschutz, geeigneten Endgeräten, hohen Übertragungskapazitäten, einfacher Bedienung sowie aktuellen und geeignet aufbereiteten (Karten-)Inhalten vor allem immer wieder eine zuverlässige Positionsgenauigkeit genannt. Weitere Informationen über die Thematik und Fragestellungen zu LBS finden sich in [MENG et al. 2005], [WUNDERLICH 2003] oder [ZIPF, STROBL 2002], ein aktuelles Praxisbeispiel für ein Fußgängernavigationssystem wird in [DRESCHER 2005] gegeben.

2.4. Anwendungsbereiche und Einsatzmöglichkeiten

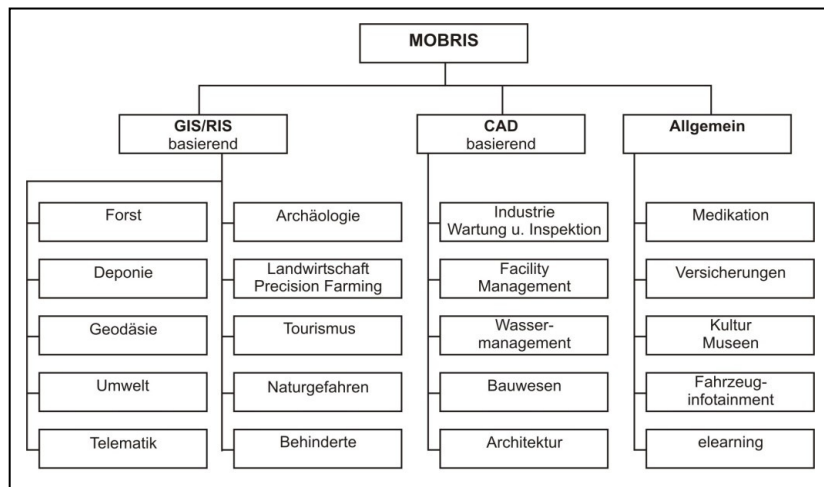


Abbildung 2-22: Anwendungsbereiche mobiler RIS [nach INGENSAND 2002]

Die Einsatzmöglichkeiten mobiler raumbezogener IS sind heute schon sehr vielseitig und sie werden sich in Zukunft durch die Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie, die durch einen hohen Grad an Miniaturisierung sowie einer potenten Steigerung der Datenübertragungskapazitäten und Rechenleistung gekennzeichnet sind, weiter vergrößern. Dabei wird die Trennlinie zwischen mobilen Applikationen aus dem Geo-Bereich und Anwendungen aus anderen Gebieten des „Mobile Computing“ verschmelzen. Denn auch sie haben den Bedarf und die Möglichkeiten von portablen Informationssystemen entdeckt und entsprechende Applikationen entwickelt, die ebenfalls den Zugriff auf räumliche Daten integrieren. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Entwicklungen von mobilen (fahrzeug- und personengestützten) Informationssystemen, so dass alle zukünftigen Entwicklungen aus dem Geo-Bereich nicht mehr separat von anderen Entwicklungen und im Gesamtkontext betrachtet werden müssen. Will man das Angebot strukturieren, so bietet sich, wie in Abbildung 2-21 dargestellt, eine Aufschlüsselung nach der verwendeten Basistechnologie oder nach eine Einteilung an, die das Nutzungsinteresse der einzelnen Systeme als Kriterium heranzieht [WUNDERLICH 2000]. Danach lassen sich drei Gruppen unterscheiden:

☞ Positionorientierte Systeme

Hierunter werden die konventionellen Anwendungen aus dem Geo-Bereich verstanden. Meist CAD-basierend steht die planliche Darstellung im Vordergrund. Sachdatenerfassung ist aber trotzdem möglich:

- Absteckung, allgemeine Vermessungsaufgaben, Geländeaufnahme (z.B. Kataster, Archäologie)
- Leitungskataster, Bestandspläne (mobile Netzinformationssysteme(NIS))
- Unfallaufnahme (Vollständigkeitskontrolle, statistische Auswertungen)
- Immobilienhandel (Erhebung v. Lage, Raumaufteilung, Präsentation)

☞ Informationsorientierte Systeme

Diese Systeme zeichnen sich durch ein erhöhtes Visualisierungs- und Interpretationspotential sowie einem aufgabenorientierten, strukturierten Angebot an Informationen aus (thematische Zusammenhänge, Zeitbezüge, Bildinformationen). Beispiele sind:

- Forstwirtschaft/Waldökologie (Forstinventur, Windbruch, Wildbewegungen)
- Katastrophenmanagement (Dokumentation, Koordination)
- Abfahrtslauf-Optimierung (Modellierung, zeitoptimierte Ergebnisse)

☞ Mischformen

Steht die Information und eine anschließende Navigation oder der umgekehrte Vorgang im Vordergrund, so lassen sich die Systeme nicht eindeutig zuordnen und bilden die dritte Gruppe:

- Tourismusinformationssystem (Navigation zu und Information über Sehenswürdigkeiten)
- Landwirtschaft (Precision Farming zur Steuerung von Aussaat, Dünger, Bewässerung)
- Facility Management (Optimierte Nutzung und Verwaltung)

3. Komponenten mobiler GIS

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Realisierung eines sensorgestützten mobilen GIS (SmobGIS) für den Einsatz im Nationalpark Bayerischer Wald. Daher wird in diesem Kapitel ein allgemeingültiges und flexibles Konzept für ein solches System auf der technischen Ebene definiert und beschrieben. Dies schließt auch die für eine Konzeption eines SmobGIS wichtigen Kriterien und einen Überblick über die für die Einzelkomponenten zur Verfügung stehenden Technologien mit ein. Diese werden maßgeblich von den Anforderungen an ein solches System bestimmt, die in diesem Fall aus dem Geo-Anwendungsbereich kommen. Das in dieser Arbeit beschriebene Zielsystem genügt somit sowohl inhaltlich als auch begrifflich der in Kap. 2.3.1 gegebenen Definition für ein sensorgestütztes mobiles Geoinformationssystem.

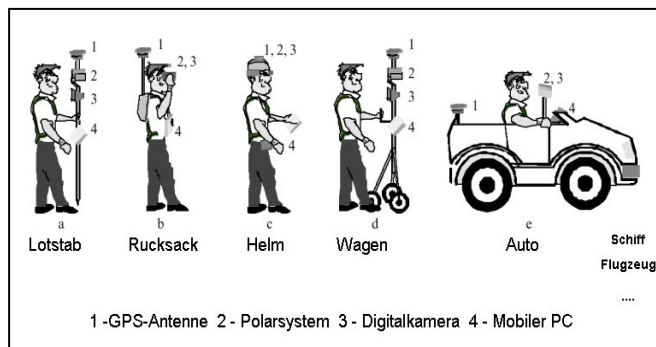


Abbildung 3-1: Varianten mobiler GIS [nach RESNIK 2001]

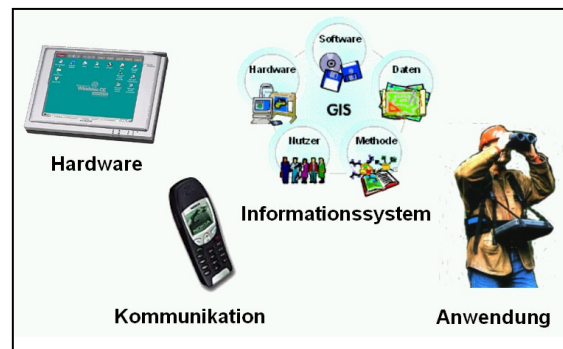


Abbildung 3-2: Grundbausteine mobiler GIS

Wie in der Abbildung 3-1 dargestellt können mobile GIS je nach Anwendung personen- oder fahrzeuggestützt betrieben werden und aus unterschiedlichen Komponenten bestehen. Hierbei sind **Grundbausteine** der Systeme identisch mit denen anderer mobiler raumbezogener Informationssysteme wie beispielsweise den ortsbezogenen Diensten oder den Fahrzeugnavigationssystemen (s. Abb. 3-2). Nimmt man diese Bausteine als Ausgangsbasis und spezifiziert, wie in [CZAJA 2000] ausgeführt, die notwendigen Anforderungen an ein mobiles **Geo-Informationssystem** u. a. mit

- Sensoren inkl. ihrer Sensorschnittstellen zur Positionierung und Objekterfassung. Dazu gehört auch die Integration nicht geodätischer Sensoren wie z.B. chemischer oder meteorologischer Sensoren,
- mobile Rechereinheit mit grafischer Oberfläche für die Erfassung und Datenanalyse vor Ort (einfache Bedienung, leicht erlernbar, sichere Datenspeicherung und ausreichende Rechenkapazitäten).
- Interoperabilität mit übergeordneten Informationssystemen durch integrierte oder gekoppelte Datenbank mit einheitlichem Datenmodell,
- Datenaustausch mit bidirektionaler, verlustfreier Schnittstelle oder Standardschnittstellen wie beispielsweise ASCII, DXF oder XML sowie Verarbeitung hybride Datentypen (Raster/Vektor).
- CAD- und vermessungstechnische Funktionen, automatische Objektbildung, Arbeiten mit Skizzen,
- Sicherheits- und Kontrollmechanismen bei Messung und Datenabgleich mit übergeordnetem Informationssystem sowie Qualitätsangaben (Genauigkeitsmaße),
- Erfassung/Bearbeitung von Sachdaten über benutzerdefinierbare Editoren und Abfrageroutinen,
- objektbasiertes Datenmodell mit kartographischen Attributen (Symbole, Linienart, Farbe, etc.)
- ausreichende Anzahl an Koordinatensystemen und –transformationen,
- Programmierschnittstelle zur Integration zusätzlicher Funktionen
- Feldtauglichkeit: geringes Gewicht; Batterieversorgung ~ 8Std.; Schutz gegen Wasser, Staub, Stöße; graphische Datenpräsentationen sind bei den üblichen Umgebungsbedingungen erkennbar,
- Ein-Mann-System (hoher Grad an Ergonomie, einfache "menschlich" bedienbare Systemkomponenten durch Nutzen neuer Eingabetechnologien wie Stift, Sprachsteuerung oder Displaybrille,)
- adäquate Software- und Datenpräsentation (auf den Anwender zugeschnitten oder adaptiv),

so gelangt man zu einem Gesamtsystem mit den in Abbildung 3-3 aufgeführten vier Hauptkomponenten:

☞ **Sensorsystem**

Die in den meisten Fällen eingesetzte Positionierungssensorik ist für die statische oder kinematische Bestimmung von Objektkoordinaten notwendig und ermöglicht die Navigation oder Ortung eines Objektes mit einer anwendungsspezifischen Genauigkeit und möglichst hohen Zuverlässigkeit. Es kann sich hierbei um ein Einzelsensor oder ein Multi-Sensor-System handeln. Die Komponente beinhaltet auch alle für den Datenaustausch notwendigen hardware- und softwaretechnischen Schnittstellen. Neben Positionssensoren können auch andere Sensortypen Bestandteil des Sensorsystems sein.

☞ **Mobile Recheneinheit mit Display und feldtauglichem Bedienungskonzept**

Hierbei handelt es sich um einen für die Anforderung geeigneten mobilen PC mit einer optimalen Benutzerschnittstelle, dem sog. Mensch-Maschine-Interface (MMI). Die Visualisierungseinheit kann beispielsweise ein integriertes oder externes Display sein (z.B. Flachbildschirm oder LCD-Brille).

☞ **Informationssystem + mobile GIS-Applikation**

Ein SmobGIS muss immer als ein Bestandteil eines übergeordneten Informationssystems betrachtet werden, so dass die verwendete GIS-Software auf dem mobilen GIS eine ausreichende Anzahl an GIS-Funktionen und Messverfahren sowie Schnittstellen für den Datenaustausch zwischen mobilem und zentralem Informationssystem aufweisen sollte.

☞ **Kommunikation**

Diese Komponente beinhaltet alle Übertragungstechnologien für eine drahtlose Datenkommunikation. Darunter fallen sowohl Lösungen für den Nahbereich (z. B. zwischen Sensor und mobiler Recheneinheit) als auch Technologien für den Datentransfer von mittleren oder großen Distanzen (z. B. Internet).

Wie bereits oben erwähnt, hängt die Auswahl oder Vorgabe der einzelnen Komponenten für ein mobiles GIS ganz entscheidend von der Anwendung ab, für die es später eingesetzt werden soll. Deshalb ist bei jeder geplanten Realisierung eine detaillierte Workflowanalyse vorab notwendig, um die Spezifikationen des Systems zu ermitteln. Anhand dieser Kriterien können anschließend die Systemkomponenten zusammengestellt, aufeinander abgestimmt und in der Praxis getestet werden. Dabei wird in der Regel ein System auf eine Anwendung zugeschnitten (z. B. mobiles Netzinformationssystem oder Biotopkartierung). Die im Falle von SmobGIS ebenfalls durchgeführte Analyse wird ausführlich in Kapitel 4 beschrieben. Um die vielfältigen Möglichkeiten an Einzelkomponenten für ein mobiles GIS aufzuzeigen, und eine Grundlage für die Auswahl der Systemkomponenten von SmobGIS zu schaffen, wird in den folgenden Kapiteln ein Überblick über die zur Verfügung stehenden Technologien gegeben.

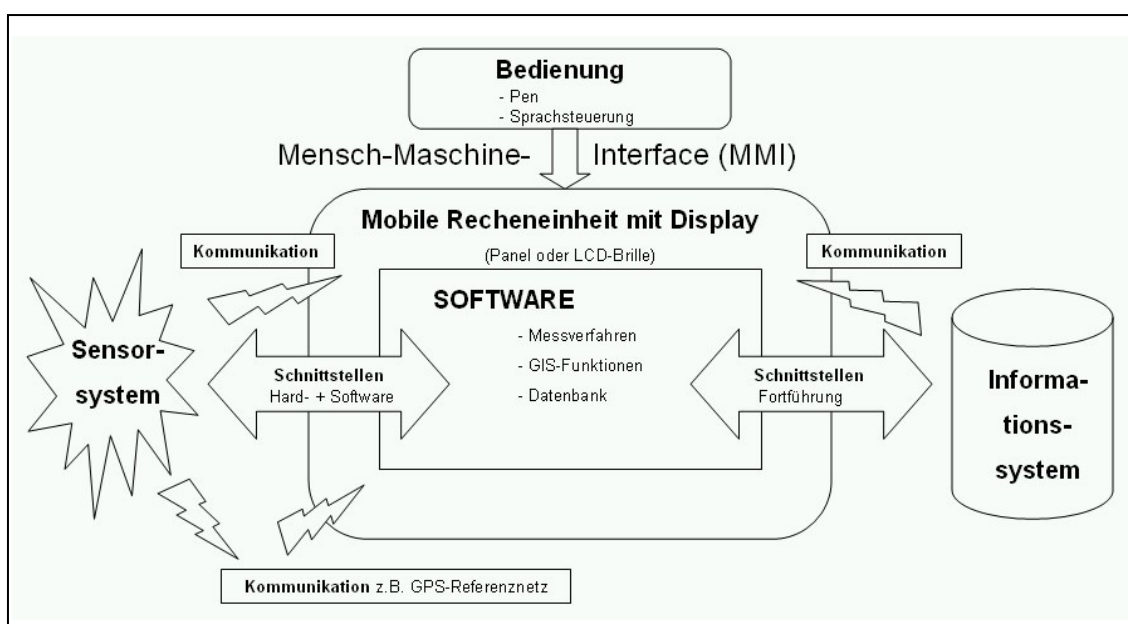


Abbildung 3-3: Hauptkomponenten eines sensorgestützten mobilen GIS

3.1. Mobile Recheneinheit

3.1.1. Kriterienkatalog

Die Auswahl des richtigen Rechners für den mobilen Einsatz hängt entscheidend von den Anforderungen der Zielapplikation ab. Da diese sehr unterschiedlich sein können, gibt es das Gerät für den universellen Einsatz nicht. So können beispielsweise die Forderungen nach einem großen Display und Eingabe über große Tastatur nicht durch einen möglichst kleinen und leichten Rechner erfüllt werden. Die mobile Recheneinheit eines mobilen GIS ist daher grundsätzlich anwendungsabhängig und stellt eine Kompromisslösung aus den in der folgenden Tabelle aufgeführten Kriterien dar [CZAJA 2002a]:

Kriterium	Aspekte
Gewicht	Wichtiges Kriterium für personengestützte Systeme, bei denen das Gewicht der Recheneinheit erfahrungsgemäß unter 2 kg liegen sollte.
Größe	Hohe Korrelation zu Gewicht und Display(-größe) sowie der Ergonomie.
Robustheit	Schutz gegen Staub, Feuchtigkeit und Erschütterungen. Eine gute Orientierung geben die vom TÜV zertifizierten IP Schutzklassen aus der DIN/VDE-Norm DIN EN 60529 oder der U.S. Militärstandard MIL-STD, die von vielen Herstellern angegeben werden ([DIN EN 60509], [MIL-STD 2004]).
Performance	Der Anwendung angepasste Rechen- und Speicherleistung.
Ergonomie	Darunter wird der Tragekomfort einer mobilen Recheneinheit verstanden, der sich neben der Größe und Gewicht auch durch die Anzahl der Einzelteile sowie des Tragesystems (z. B. Hände, Brust- oder Hüftgürtel) ergibt.
Betriebsdauer	Ausreichende und praktikable Energieversorgung für einen vollen Arbeitstag (~ 8h, geringer Kälteeinfluss, Wechseln der Akkus im Betrieb), kleine und leichte Akkus
Bedienung (MMI)	Eingabemethoden Tastatur/Maus/Stift/Sprache einzeln oder in Kombination einsetzbar. Vor- und Nachteile beachten/nutzen (s. Kap. 3.1.2).
Datenspeicherung	Keine Verwendung von flüchtigen Speichern, die bei fehlender Stromversorgung den Programm- oder Dateninhalt verlieren
Display	Größe und verwendete Bildschirmtechnologie haben großen Einfluss auf die Datenpräsentation unter den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Große Helligkeit erfordert reflektive Eigenschaften, dunkle Umgebungsbedingungen hingegen Hintergrundbeleuchtung (transmissive Technik). Details finden sich u. a. in [WALKER 2001]
Tastatur	Hohe Korrelation zu Größe und Gewicht des mobilen Rechners. Vor allem bei vielen alphanumerischen Eingaben notwendig/sinnvoll, wobei der Eingabekomfort von der Tastaturgröße und -typ abhängig ist (vollwertige oder nur Zahlentastatur)

Tabelle 3-1: Kriterienkatalog mobile Recheneinheit

3.1.2. Mensch-Maschine-Interface

Neben der reinen Computerhardware spielt die Bedienung der mobilen Recheneinheit für den praktikablen und damit effizienten Einsatz eines mobilen GIS eine entscheidende Rolle. Sie muss sich ebenso wie die verwendete Hardware an den Anwendungszielen orientieren. Es macht beispielsweise keinen Sinn, sehr detailorientierte Grafikarbeiten auf einem kleinen Display durchzuführen oder einen handgetragenen Bildschirm/Rechner bei Arbeiten zu verwenden, die möglichst viel Bewegungsfreiheit erfordern.

Die Grenze, an der wir Menschen mit Maschinen in Kontakt treten und sie benutzen, bezeichnet man als *Mensch-Maschine-Schnittstelle* (engl. Human-Machine Interface, Man-Machine Interface). In Bezug auf Programme und Betriebssysteme spricht man meist von *Benutzerschnittstellen* oder *Benutzeroberflächen*, die hinsichtlich ihrer grafischorientierten Eigenschaften auch *Graphical User Interface* (GUI) genannt werden. Die *Mensch-Maschine-Schnittstelle* ist ferner der Oberbegriff für Befehle, Anzeigen, Steuerelemente und Hardwaregeräte, die es dem Menschen ermöglichen, einen Informationsaustausch mit dem Rechnersystem vorzunehmen. Hierzu äquivalent kann der Begriff *Mensch Computer Interaktion* (engl. Human Computer Interaction) verwendet werden. Das gleichnamige Forschungsgebiet beschäftigt sich mit dem Design, der Evaluierung und Implementierung von interaktiven Computersystemen und behandelt u. a. Themen wie Ein- und Ausgabemedien, Ergonomie, Informationsdarstellung oder Dialogtechniken [ACM SIGCHI 2004]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen nachfolgend lediglich zwei für mobile GIS wichtige Bereiche aus diesem weiten Feld kurz beleuchtet werden, und zwar Aspekte zu den Ein- und Ausgabe-Technologien sowie zur Informationspräsentation.

Für die **Ein- und Ausgabe** von Informationen bei mobilen Geoinformationssystemen stehen heute die in Tabelle 3-2 aufgelisteten Technologien zur Verfügung. Die Kriterien für die Auswahl einer Technologie können sein:

- freihändig bedienbar
- unauffällig, nicht störend, diskret
- effizient, d.h. präzise, rasch und zuverlässig
- im Gehen, parallel mit anderen Handlungen ausführbar

Eingabe	Ausgabe
Maus	Display
Tastatur	Head Mounted Display
Stift (Pen)	LCD-Brille
Touchpad	Sprachausgabe
Sprachsteuerung	
Eye Control	
Biosensorik	

Tabelle 3-2: Ein- und Ausgabe Technologien

Neben den üblicherweise bei Notebooks verwendeten Standardtechnologien Maus/Touchpad und Tastatur ist die heute gebräuchlichste Lösung das in der Recheneinheit integrierte oder auch als externes Modul angebotene Display, das aktiv mit einem Stift oder lediglich passiv durch Druck (Touchscreen) bedient werden kann. Der Stift ist ein im täglichen Leben bekanntes Schreibgerät, welches dem Benutzer vertraut ist und gut von der Hand geführt werden kann. Man braucht wenig Zeit zur Eingewöhnung bei der Bedienung des Computers. Außerdem ist die Erkennung von Zeichen und Schrift möglich, auch wenn man sich an genaue Vorgaben halten muss. Die Qualität der grafischen Darstellung der Displays bei Tageslicht ist in den letzten Jahren vor allem mit reflektiven bzw. transflektiven Displays verbessert worden.

Ein entscheidender Fortschritt gegenüber dem aktuellen Pencomputing könnte dadurch erzielt werden, dass die Bildschirminformation unmittelbar dem Auge präsentiert würde, wie dies z. B. bei Automobilherstellern für ihre Premiummodelle durch Einspiegelung in die Windschutzscheibe bereits eingeführt oder in Planung ist (z. B. [BMW 2006], [CITROEN 2006]). Damit ließen sich sowohl die Displaygröße als auch der Stromverbrauch reduzieren. Allerdings müssen bei personengestützten System Head-Up- oder Head-Mounted-Displays (HMD) verwendet werden, wie sie aus dem Bereich der Virtual Reality bekannt sind. HMDs verwenden kleine Monitore, die in einem optisch günstigen Augenabstand von ca. 20 cm ein Bild erkennen lassen. Entsprechende Displays sind vorhanden und lassen sich in Brillen [MOPTIC 2006] und in Zukunft sogar in „aktiven Kontaktlinsen“ einbauen. Mit einer HMD-Lösung fällt allerdings die Pen-Bedienung weg. Diese muss durch andere Bedienungselemente ersetzt werden, wie z. B. einem Touch-Pad, welches am Unterarm befestigt ist und auf Fingerberührung reagiert. Spezielle Handschuhe, die mit Bewegungs- oder Berührungssensoren ausgerüstet sind, können ebenfalls als Bedienungselemente in Erwägung gezogen werden (Biosensorik). Als weitere Variante könnte die Steuerung mittels Augenbewegungen hinzukommen, eine Technik, die für Foto- und Videokameras bereits entwickelt ist [CANON 2004]. In Verbindung mit Sprachsteuerung ergeben sich weitere Möglichkeiten in der Bedienung der Sensoren und der Software sowie der (GIS-) Objektbezeichnung (z. B. [VOICE INSIGHT 2004]) Mit diesen neuen Lösungen bleiben die Hände weitgehend für die Bedienung der Messinstrumente frei, auch die notwendige Mobilität des Beobachters bleibt erhalten Eine solche Konfiguration für ein personengestütztes GIS zeigt beispielhaft Abbildung 3-4. Ein Beispiel aus der Praxis findet sich in Kap. 3.1.3.

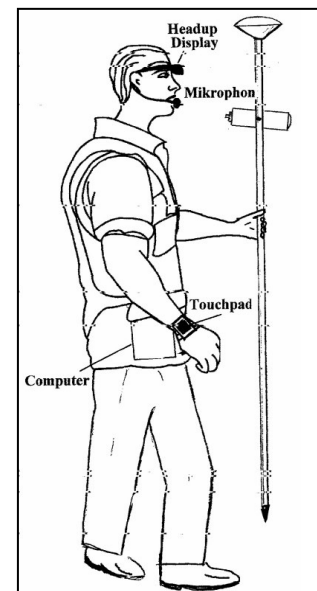


Abbildung 3-4: MMI mobiler GIS [INGENSAND 2002]

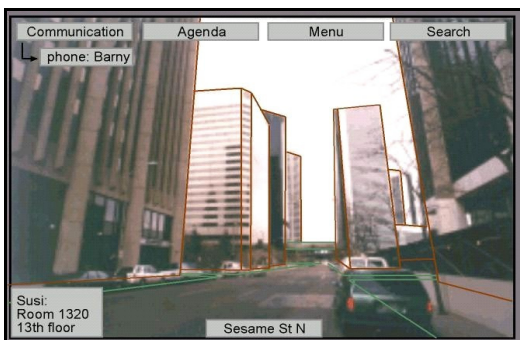


Abbildung 3-5: Augmented Reality

In Bezug auf eine benutzergerechte **Informationspräsentation** lassen sich diese Technologien ebenfalls effizient einsetzen. So können mit Hilfe der beschriebenen HMDs reale und virtuelle Welt überlagert werden, so dass eine erweiterte Realität entsteht (*Augmented Reality*). Der Vorteil der Einbettung der künstlichen Objekte in den echten Blick liegt in der unmittelbaren Visualisierung von Informationen (Aktualität) und dem direkten Vergleich der digitalen Daten mit dem realen Objekt (Kontrolle). Dadurch ist eine der natürlichen Wahrnehmung sehr ähnliche und damit effiziente Informationsverarbeitung möglich ist.

3.1.3. Produktvarianten mobiler Rechner

Im folgenden Kapitel soll ein kurzer Überblick über die für den Einsatz von mobilen GIS zur Verfügung stehenden mobilen Recheneinheiten gegeben werden. Auf Grund der extrem rasanten Entwicklungsschritte in diesem Bereich beschränkt sich die Zusammenstellung auf die wesentlichen Gerätetypen und verzichtet auf eine umfangreiche Präsentation von technischen Details. Grundsätzlich ist eine Verschmelzung von den drei Technologiebereichen *Mobile Computing*, *Mobile Communication* und *Positioning* zu beobachten, was sich positiv auf die Entwicklung geeigneter mobiler Rechner für mobile GIS auswirkt.

Geräteklasse		typ. Größe [cm]	typ. Gewicht [kg]	Eingabe	typ. Displaygröße	Betriebs- System
Notebook	Notebook	30x24x5	3-4	Tastatur Maus, Stift	farbig > 12"	Windows Linux
	Sub-Notebook	26x21x4	1,3-2,4	Tastatur Maus, Stift	farbig 10"-12"	Windows Linux
	Mini-Notebook	24x17x4	0,9-1,4	Tastatur Maus, Stift	farbig 7"-11"	Windows Linux
Handheld PDA	Handheld- PC Pro	23x18x4	1,2	Tastatur Stift	farbig 8"-11"	WindowsCE.NET Linux
	Handheld-PC	19x10x3	0,4	Tastatur Stift	farbig ~6"	WindowsCE.NET Palm OS, Linux
	Pocket-PC	8x12x2	0,1 – 0,2	(Tastatur) Stift	farbig 3,5"	WindowsCE.NET Palm OS, Linux
Mobil- telefon	Wireless Handheld	7x11x2	0,1 – 0,2	Tastatur	farbig	WindowsCE.NET
	Smartphone	5x10x2	0,1 – 0,15	Stift	2"-3,5"	Symbian, PalmOS
Organizer	Organizer	3x5x1	0,1	Stift	farbig/sw	Palm OS

Tabelle 3-3: Geräteklassen mobiler Recheneinheiten (Stand: 08 / 2005)

Wie in Tabelle 3-3 aufgeführt, lassen sich gängige mobile Rechner in verschiedene Geräteklassen einteilen, wobei eindeutige Begriffsdefinitionen auf dem Markt nicht existieren. Außerdem fehlen in dieser Auflistung die bei mobilen GIS häufig verwendeten Pen-Computer/Tablet-PC oder Neuentwicklungen im Bereich der „Wearable Computer“ (Vest- oder Beltcomputer). Sie stellen Mischformen dar und können deshalb je nach technischer Spezifikation verschiedenen Geräteklassen zugeordnet werden. Für den Einsatz bei mobilen GIS bieten sich vor allem folgende Geräte an:

Handheld/Personal Digital Assistant (PDA)

Unter die Klasse der *Personal Digital Assistant* fallen etwa handgroße, mobile PCs mit Touchscreen und teilweise Tastatur, die auch als *Handheld* bezeichnet werden. Davon abgeleitete Begriffe wie *Pocket PC* oder *Handheld PC* sind aus marketingstrategischen Gründen entstanden oder geben spezifischen Merkmalen Ausdruck (z. B. Größe). Die Entwicklung der PDAs hat in den letzten Jahren große Fortschritte hinsichtlich der Performance, der Speichermedien und der mobilen Datenkommunikation gemacht. Letzteres führt zu den Begriffen *wireless Handheld* und *Smartphone*, die (je nach Hersteller) für Geräte verwendet werden, die entweder einen PDA um Mobiltelefonfunktionalität oder ein Mobiltelefon um PDA-Funktionalität erweitern. Diese Geräteklasse erfreut sich wachsender Beliebtheit, da sie klein, leicht, einfach mit externem Zubehör (z.B. GPS) zu koppeln und verhältnismäßig kostengünstig zu erwerben sind. Es muss aber deutlich gemacht werden, dass PDAs in der Regel für Büro- und Multimedia-Anwendungen konzipiert sind. Es stehen kaum feldtaugliche Produkte auf dem Markt zur Verfügung und auch die Displaygröße erweist sich in vielen Fällen für eine detailreiche Geodatendarstellung als zu klein.

Notebooks/Pen-Computer/Tablet PC

In dieser Geräteklasse ist das Angebot am größten und vielseitigsten, wobei vor allem die *feldtauglichen Notebooks* sowie die meist tastaturlosen *Pen-Computer* bei mobilen GIS-Anwendungen eingesetzt werden. Letztere ordnet man auf Grund ihrer Größe (> DIN A4) und Leistungsfähigkeit in der Regel dieser Geräteklasse zu. Sie werden auch als *PenTablets*, *PenPads* oder *Tablet PC* bezeichnet. Vor allem der von der Firma Microsoft definierte Standard des Tablet PC mit dem zugehörigen Betriebssystem *Windows XP Tablet PC* hat sich in den letzten beiden Jahren auf dem Markt etabliert, das sich u. a. durch eine leistungsstarke Schrifterkennungssoftware auszeichnet.

Die in dieser Geräteklasse angebotenen Pen-Computer bzw. Tablet-PC-Produkte verfügen über einen farbigen, (meist) tageslichttauglichen und (meist) drucksensitiven Bildschirm und werden über einen Stift bedient. Es gibt aber auch Produkte mit verkleinerter oder vollständiger Tastatur sowie Notebook-Modelle, bei denen sich das Display umklappen lässt (sog. *Convertibles*). Dadurch kann das Gerät im Bedarfsfall als reiner Tablet-PC verwendet werden. Ein Beispiel hierzu wird in Kapitel 4 gegeben. Die Gehäuse- und Displaygröße sowie das Gewicht der Geräte können je nach Sub-Geräteklasse sehr unterschiedlich sein. Zur Verbesserung des Tragekomforts stehen sog. „Bauchläden“ zur Verfügung, so dass der Rechner bequem vor der Brust getragen werden kann. Ein Problem stellt oft noch die Energieversorgung dar, so dass für ein 8 Std.-Arbeitsstag mehrere Akkus zur Verfügung stehen müssen. Durch die von einigen Herstellern anvisierten Zielgruppen mit Anwendungen im Innenraum (z. B. Vertriebswesen, Lagerverwaltung), finden sich auch nur wenig feldtaugliche Produkte auf dem Markt. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den feldtauglichen Notebooks, die sich zu den Bürogeräten hauptsächlich in ihrer Rechenleistung und ihrem Gewicht (bis zu 5,5 kg) unterscheiden. Dafür sind diese Geräte staub-, vibrations- und spritzwassergeschützt und können auch bei niedrigen Temperaturen eingesetzt werden. Die Akkuleistung liegt bei 3-5 Stunden, Displays sind bis zu 15“ groß. Einige Hersteller bieten ihre Produkte auch mit praktischen Touchscreens aus, Datenschnittstellen und Kommunikationshardware sind ausreichend vorhanden. In der Abbildung 3-6 werden Produktbeispiele für PDA [FSC 2004], Handheld-PC [PANASONIC 2004], Pen-Computer [METTENMEIER 2004] und feldtaugliches Notebook [ITRONIX 2004] gegeben.



Abbildung 3-6: Produktbeispiele PDA, Handheld-PC, Pen-Computer und feldtaugliches Notebook

Wearable Computers

Die bisher dargestellte Hardware weist weiterhin Nachteile für viele mobile Anwendungen auf. So ist beispielsweise die Bedienung mittels Tastatur oder Stift in vielen Fällen unpraktisch, da der Anwender „seine Hände nicht frei hat“. Auch die Verknüpfung von Recheneinheit und Display ist nicht immer sehr feldtauglich (Größe/Gewicht/Lesbarkeit bei Helligkeit). Deshalb begannen Mitte der 90iger Jahre vor allem Forschungsinstitute von Universitäten und des Militärs in den USA und Canada Konzepte für „tragbare“ Computer einer neuen Generation zu entwickeln. Sie bezeichnet man als *Wearable Computer* (*WearComp*, *Wearables*), zu denen z. B. die sog. Gürtel- und Westencomputer (*Belt-* und *Vestcomputer*) gehören. Die Definition der sechs Eigenschaften des *Wearable Computing* lautet [MANN 1998]:

1. Keine Einschränkung der Aufmerksamkeit des Anwenders !
2. Keine Einschränkung der Bewegungsfreiheit !
3. Bedienung zu jeder Zeit (Sleep Modus, niemals „aus“)!
4. Permanente Kontrolle durch den Anwender ! Einfache Bedienungsphilosophie !
5. Aufmerksamkeit gegenüber der Umgebung (z.B. Sensoren Erfassen die Umgebung) !
6. Kommunikation (*WearComp* als Kommunikationsmedium verwenden) !

Dieses Konzept sieht eine völlig neue Beziehung zwischen Mensch und Computer vor. Ausgangspunkt ist ein kleiner, am Körper tragbarer Computer (evtl. in der Kleidung integriert), der ständig einsatzbereit und ansprechbar ist und mit dem Anwender kommuniziert, ihn leitet und unterstützt. Werden Informationen oder Daten benötigt, dann liefert sie der Computer in einem multimedialen Format und in Echtzeit. Dabei kann sich reale und virtuelle Welt mit Hilfe von Datenbrillen überlagern und es entsteht die bereits angesprochene erweiterte Realität. In der Produktion oder bei gefährlichen Wartungsaufgaben werden diese Systeme bereits seit längerem eingesetzt. Aber auch andere Anwendungen, wie beispielsweise im Tourismus [DEEP MAP 2004] oder im Museumsbereich [ORBIT 2004] wurden bereits prototypisch realisiert. Die folgende Abbildung auf der nächsten Seite stellt das technische Grundprinzip, ein Produktbeispiel und eine Anwendung aus dem Industriebau dar.

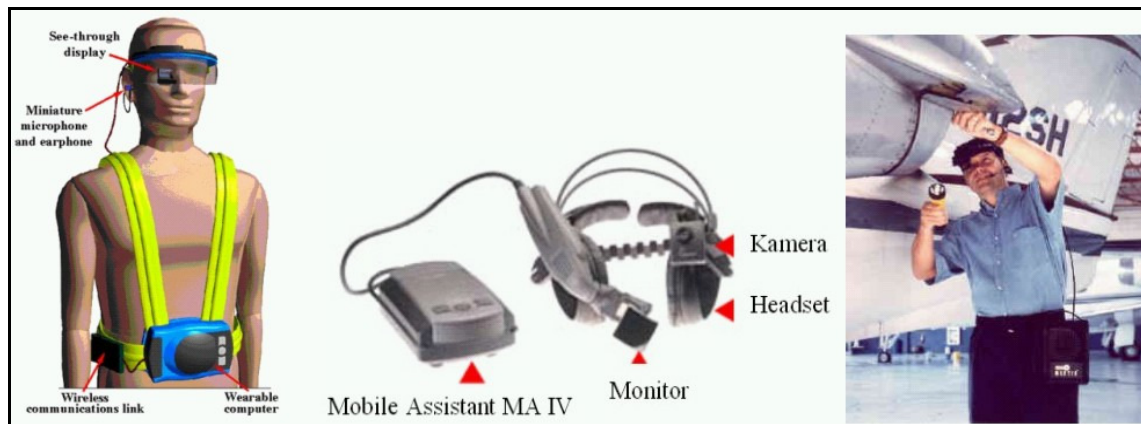


Abbildung 3-7: Technisches Konzept, Produkt- und Anwendungsbeispiel WearComp [CZAJA 2002a]

Überträgt man die o. g. Eigenschaften auf den Anwendungsbereich von mobilen GIS und berücksichtigt die in Kap. 3.1.2 diskutierten Aspekte hinsichtlich eines effizienten Mensch-Maschine-Interface, dann kann ein *WearComp* für mobile GIS aus den in Abbildung 3-8 gezeigten Komponenten bestehen. Erste prototypische Realisierungen im Bereich der Geodatenerfassung für Energieversorgungsunternehmen mit Hilfe eines AR-Fernglases und im Vermessungswesen mit einem HMD sind in [ROBERTS 2002] und [INGENSAND 2000] beschrieben. Ein aktuelles Beispiel für ein mobiles GIS mit WearComp, Spracherkennung und GPS-Ortung, das diesem Konzept schon weitgehend entspricht, zeigt Abbildung 3-9. Es sei an dieser Stelle aber angemerkt, dass die zur Verfügung stehende Hardware noch nicht ausreichend feldtauglich und auch sehr kostenintensiv ist, da es sich um Spezialprodukte handelt.

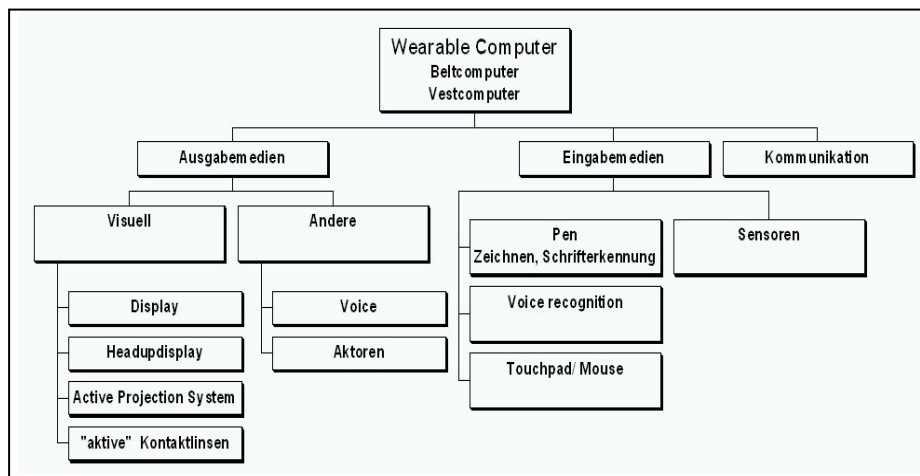


Abbildung 3-8: Konzept WearComp für mobile GIS [INGENSAND 2000]



Abbildung 3-9: Beispiel WearComp mobiles GIS [HUNTER 2004]

3.2. Zentrales Informationssystem und mobile Applikationssoftware

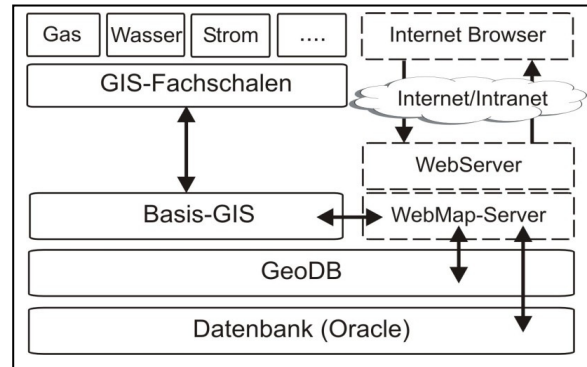
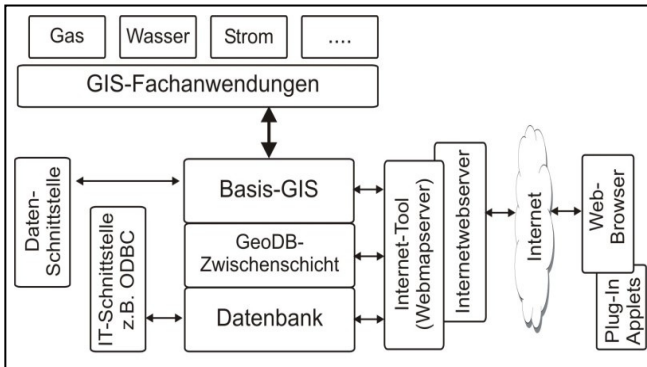


Abbildung 3-10: Standardarchitektur Desktop + Internet-GIS Abbildung 3-11: Standardarchitektur High-End-GIS

Ein sensorgestütztes mobiles GIS kann aus Sicht der Systemarchitektur als ein eigenständiges Informationssystem verstanden und eingesetzt werden, steht aber bei den meisten Applikationen in engem Kontakt mit einem zentralen GIS. Diese lassen sich anhand ihrer Architektur in Standard/Desktop-, Internet- oder Client/Server- („High-End“)-GIS unterscheiden (s. Abb. 3-10, 3-11). Der Client stellt hierbei eine stand-alone oder netzwerkfähige Software für den PC-Arbeitsplatz oder nur ein Internet Browser mit Zusatzfunktionen dar. Außerdem können unterschiedliche logische Konzepte und Datenbankmanagementsystem (DBMS) für die Modellierung der realen Welt in einem Datenmodell und deren physikalische Verwaltung zum Einsatz kommen. Neben dem bisher gebräuchlichsten relationalen Datenmodell (RDBMS) werden heute verstärkt objektrationale Modelle (ORDBMS) bei zentralen GIS eingesetzt. In Zukunft ist auch mit dem Einsatz von objektorientierten Verfahren (OODBMS) zu rechnen. Die wesentlichen Unterschiede der einzelnen Modelle sind in der folgenden Tabelle 3-4 und der Abbildung 3-12 zusammengefasst.

RDBMS:	<ul style="list-style-type: none"> • relational • Datenspeicherung in Tabellen • Konsistenz über Verknüpfungen zwischen Tabellen • Abfragesprache SQL
ORDBMS:	<ul style="list-style-type: none"> • Objektoriental • Datenspeicherung in Tabellen und komplexen Objekten • Konsistenz über Verknüpfungen zwischen Tabellen und Objekten • Abfragesprache SQL mit Erweiterungen
OODBMS:	<ul style="list-style-type: none"> • Objektorientiert • Datenspeicherung in Objekten • Konsistenz über Objektbeziehungen • Kein Abfragesprache, nur Objektschnittstellen

Tabelle 3-4: Eigenschaften von DBMS-Konzepten

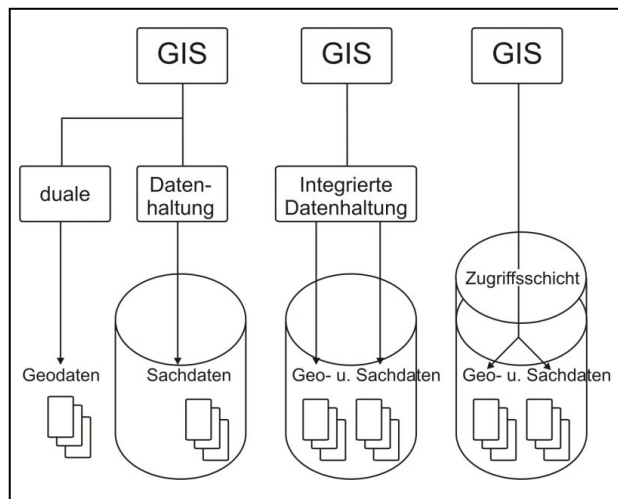


Abbildung 3-12: Unterschiede der GIS-DBMS-Konzepte

Die *Applikation*, die durch die Aufgabenstellung definiert wird (z.B. Leitungsinformationssystem, Biotopkartierung etc.), greift auf das Informationssystem zu und bestimmt die *Architektur* des zentralen und mobilen GIS sowie den *Funktionsumfang* der zu verwendenden mobilen Applikationssoftware. Es liegt auf der Hand, dass die Architektur wiederum in wechselseitiger Beziehung zum Funktionsumfang steht. So kann bei mobilen Geoinformationssystemen hinsichtlich der Systemarchitektur zwischen einer *Client/Server*-Struktur oder eine *Stand-alone* Lösung unterschieden werden, wobei sich die Client/Server-Architektur noch in *Thin Client* und *Thick Client* untergliedern lässt. Diese Unterteilung drückt sich in Unterschieden u. a. in der Funktionalität/Datenspeicherung, der Bedeutung einer online Verbindung oder in der eingesetzten mobilen Hardware aus, die in der Tabelle 3-5 zusammengefasst sind. Welche Architektur sinnvoll ist, hängt von der Art der Anwendung ab. Wie bereits in Kapitel 1.2 erläutert, muss bei der mobilen Verarbeitung von Geodaten zwischen den drei Anwendungsfällen *Erfassung*, *Auskunft* und *Fort-*

	Client / Server-Architektur		Stand alone
	Thin Client	Thick Client	
Funktionalität / Datenspeicherung	Mobiles Gerät nur als Benutzerschnittstelle, GIS-Funktionalität und Daten auf Server	Mobiles Gerät stellt GIS-Funktionalität zur Verfügung, Daten über Internet	Mobiles GIS stellt eigenes GIS dar (Daten + Funktionen)
Online Verbindung	Performante online Verbindung über Netzwerk (abhängig v. Datenvolumen)	Performante online Verbindung über Netzwerk (abhängig v. Datenvolumen)	Online Verbindung nur für spezielle Dienste (z. B. LBS)
Mobile Hardware	PDA, Smartphone	Tablet/Pen-PC, Belt-PC	Notebook / Tablet-PC

Tabelle 3-5: Merkmale von Systemarchitekturen mobiler GIS

führung unterschieden werden, da sie nachhaltigen Einfluss auf die einzelnen Komponenten eines mobilen GIS haben. Wie in Abbildung 3-13 vereinfacht dargestellt nimmt hierbei die Komplexität hinsichtlich eines verlust- und fehlerfreien Datenaustausches zwischen mobilen und zentralem GIS von der Auskunft über die Erfassung bis hin zur Fortführung zu. Gilt es bei der Auskunft die gewünschten raumbezogenen Informationen eines zentralen Datenbestandes auf einem mobilen Endgerät für Abfragen zur Verfügung zu stellen, muss bei der Erfassung der zentrale Datenbestand um neue Geoobjekte nach eingehender Prüfung und Kontrolle ergänzt werden. Im Fall einer Fortführungsaufgabe ist ein Ausschnitt aus dem zentralen GIS auszulesen und nach der Aktualisierung mit dem mobilen System in die zentrale Datenbank ebenfalls nach Prüfung und Kontrolle retransferiert werden. Am einfachsten ist es daher, die Datenhaltung im Feld an dem Datenkonzept des zentralen Informationssystems zu orientieren [WILTSCHKO, 1999]. Das setzt voraus, dass die Hersteller GIS-Produkte sowohl für die mobile als auch die zentrale GIS-Plattform bereitstellen. Eine andere Möglichkeit liegt in dem Einsatz von Datenaustauschkomponenten auf Basis von allgemein anerkannten Standards oder Normen wie sie beispielsweise durch die „Quasi-Standardformate“ SHP, DGN, DXF etc. der führenden GIS Hersteller oder durch die Web Services des Open Geospatial Consortiums (OGC) definiert wurden [OGC, 2005]. Vor allem der OGC-Standard wird in den letzten Jahren vermehrt umgesetzt, um eine effiziente und breite Nutzung von verteilten Geodaten über das Internet herstellerunabhängig zu ermöglichen [DONAUBAUER 2004].

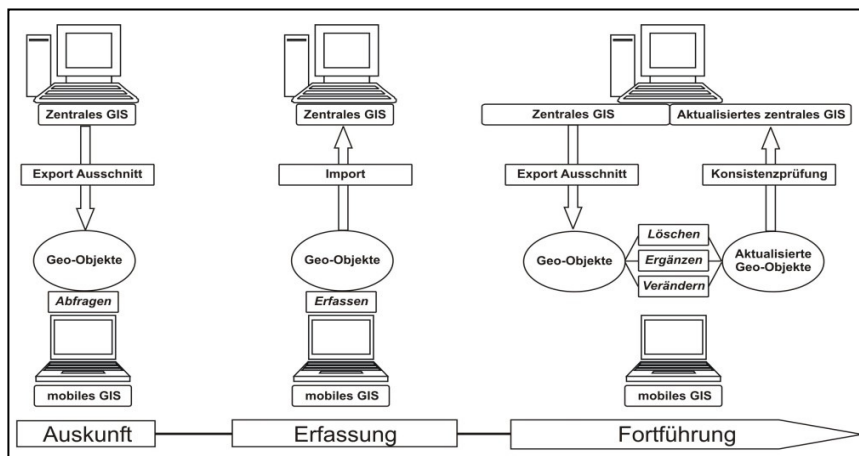


Abbildung 3-13: Datenaustausch zwischen mobilem und zentralem GIS

Der Funktionsumfang einer Applikationssoftware für mobile GIS kann daher zusammenfassend wie folgt beschrieben werden [CZAJA 2003a]:

- ausreichende Anzahl an Sensorschnittstellen (GPS, Tachymeter, Laserrangefinder...) und Unterstützung der jeweils geeigneten Messverfahren (Polaraufnahme, Polygonzug, etc.)
- Sicherheits- und Kontrollmechanismen bei der Messung und beim Datenabgleich mit Qualitätsangaben (Genauigkeitsmaßen) und Protokollfunktionen
- Koordinatensysteme und -transformation (on the fly)
- CAD- und geodätische Rechenfunktionen mit automatischer Objektbildung (z.B. Linienbildung)
- Systeminterne Datenbank oder Verbindung über ODBC bzw. Standardschnittstellen (z.B. DBF)
- Proprietäre und offene Geodatenchnittstellen (ASCII, XML, DXF, DGN, SHP, WMS, WFS, etc.)
- Hybride Datenverarbeitung (Raster/Vektor) mit Georeferenzierung
- Bearbeitung von Sachdaten über benutzerdefinierbare Editoren und Abfrageroutinen (z.B. mit SQL)
- Offenes Objektmodell mit Programmierschnittstellen (Visual Basic, COM, Java, etc.)

3.3. Mobile Datenkommunikation

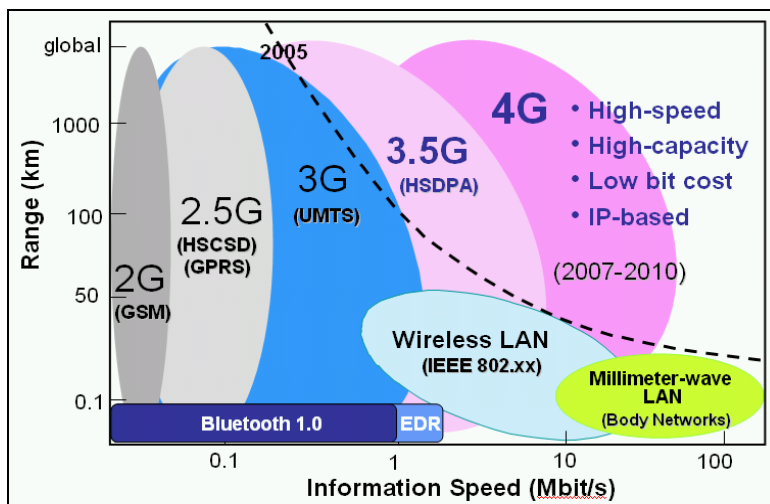


Abbildung 3-14: Mobile Kommunikationstechnik [nach KELLERER 2002]

weite) und mobilen (uneingeschränkte Reichweite) Netzen klassifiziert [ROTH 2002]. Die Abbildung 3-14 gibt einen Überblick über aktuelle und zukünftige Technologien, die auch bei mobilen raumbezogenen Informationssystemen eingesetzt werden. Im Hinblick auf mobile GIS lassen sich nach [CZAJA 2002a] drei Kommunikationswege unterscheiden, die nachfolgend kurz beschrieben werden sollen.

1. Verbindung zwischen Sensor und mobiler Recheneinheit (Reichweite 0-1000 m)

Neben der bekannten und bewährten, aber einschränkenden Kabelverbindung, kommen hier lokale Datenfunksysteme wie *Bluetooth*, *WLAN (Wireless Local Area Network)* oder *Funkmodems* zum Einsatz.

☞ Datenfunkmodems

Datenfunkmodems werden bereits seit gut zehn Jahren in diesem Bereich eingesetzt und sind durch eine geringe Datenrate von wenigen kBit/s und einer reduzierten Sendeleistung (< 0,2 Watt) gekennzeichnet. Damit sind Reichweiten bei nicht gerichteter Ausstrahlung von ca. 500 m möglich, mit Antennenausrichtung und bestehender Sichtverbindung können Entfernungen bis 1000 m erreicht werden. Ein typisches Beispiel ist das Datenfunkmodem *TCPS 26/27* von Leica-Geosystems, das als Feldtelemetrie eingesetzt werden kann, um beispielsweise einen elektronischen Tachymeter aus der Ferne zu bedienen und Messdaten zur mobilen Recheneinheit zu übertragen.

☞ Bluetooth

Im Nahbereich (< 10 m) setzt sich seit der Markteinführung 1998 die *Bluetooth*-Technologie (BT) als weltweiter Standard durch. BT basiert auf der Übertragung von Funkwellen im Frequenzbereich von 2,4 – 2,48 GHz. Dieses sog. ISM Band (Industrial, Scientific, Medical) hat den Vorteil, dass es weltweit überall ohne Lizenzen genutzt werden kann. Mit BT V1.0 sind theoretisch Datenraten von 1 Mbit/sec. möglich, faktisch werden aber nur 0,72 Mbit/sec. erreicht. Die Reichweite beträgt bei Sichtverbindung max. 100 m. Nicht nur bei Mobiltelefonen, sondern auch bei mobilen Rechnern wie PDAs oder Tablet-PC steht heute schon eine Vielzahl an Produkten mit BT zur Verfügung. Ebenso werden auf Seiten der Sensorik immer mehr Geräte, wie z. B. GPS-Empfänger oder Tachymeter, mit dieser Technologie ausgestattet. Es ist abzusehen, dass die Verbindung zwischen den Sensoren, MMI-Komponenten und Peripherie in Zukunft die BT-Technologie übernehmen wird, so dass die störenden Kabel entfallen können.

☞ WLAN

Der Begriff *Wireless LAN* wird häufig auf zwei verschiedene Arten verwendet. Zum einen wird WLAN als Sammelbegriff für alle drahtlosen lokalen Netzwerke verstanden. Zum anderen steht der Begriff für drahtlose Netze, die auf dem Standard IEEE 802.11 aufbauen (Institut of Electrical and Electronics Engineers). Dieser wurde seit 1997 mehrfach erweitert, so dass je nach Realisierung max. Datenübertragungsraten von 11 – 54 Mbit/s zur Verfügung stehen und Reichweiten (bei Sichtkontakt) von ca. 100 m möglich sind. Inzwischen hat der WLAN-Standard eine große Verbreitung im Bereich lokaler Netze erlangt. Heute ist bereits eine drahtlose Verbindung ins Internet/Intranet in vielen Firmen und an vielen öffentlichen Plätzen sowie im Café, Hotel oder am Flughafen über sog. *Access Points* möglich.

Für den effizienten Einsatz eines mobilen GIS ist neben der bekannten Kabelverbindung vor allem die mobile Datenkommunikation von entscheidender Bedeutung. Nicht nur störende Kabel, sondern auch im Hinblick auf einen ungestörten Zugang zu raumbezogenen Daten, die nicht notwendigerweise auf dem mobilen System gespeichert sein müssen, sind je nach Anwendung leistungsstarke Datenübertragungstechniken mit unterschiedlichen Reichweiten erforderlich. Die für die Datenkommunikation eingesetzte Technik wird hierbei häufig nach drahtlosen (eingeschränkte Reich-

2. Verbindung zwischen Sensor und Datendiensten (Reichweite 5-1000 km)

Dieser Kommunikationsweg ist vor allem bei der Verwendung von Sensoren für die Satellitenpositionierung von Bedeutung, damit Korrekturdaten für eine höhere Positionsgenauigkeit in Echtzeit zur Verfügung stehen. Kommen die Korrekturen von einer lokalen Referenzstation, so reicht wiederum der Einsatz von *Datenfunkmodems* aus, die jeder GPS-Systemanbieter in seinem Programm hat. Durch die (in Deutschland gesetzmäßig) eingeschränkte Sendeleistung von max. 0,5 Watt sind je nach Topographie Reichweiten zwischen 5 und 10 km möglich. Einige Hersteller bieten auch Repeater-Stationen an, um hier längere Entfernungen überbrücken zu können. Werden die Korrekturdaten von kommerziellen Echtzeitpositionierungsdiensten, wie z. B. SAPOS, ascos oder Omnistar, verwendet, dann kommen *Mobilfunk*, *Radiowellen* (*Loran-C/Lang-Welle/Ultra-Kurz-Welle/Beacon*) oder *Satellitenkommunikationssignale* als Übertragungsmedium in Frage. Je nach Einsatzgebiet (Umgebungsbedingungen) und vor allem Kostenrahmen ist die eine oder andere Lösung sinnvoll.

3. Verbindung zu zentralem GIS/globalen Informationssystem (Reichweite lokal - global)

Für die Realisierung eines Daten- und Informationsaustausches zwischen mobilen und zentralen GIS stehen in erster Linie die o. g. *WLAN-Technik*, *Mobilfunk* und *Satellitenkommunikation* zur Verfügung. Während beim drahtlosen WLAN-Netz die Reichweite eingeschränkt ist, ermöglichen die beiden anderen Verfahren eine mobile Datenkommunikation mit (theoretisch) unbeschränkter Reichweite.

☞ Mobilfunk

Historisch betrachtet stellt der heute weltweit genutzte Datenstandard *GSM* (*Global System for Mobile Communication*) den Übergang von analogen auf digitale Mobilfunknetze dar, und wird daher als die zweite Mobilfunkgeneration (2G) bezeichnet. GSM ist ein zellenbasierter Vollduplex-Funkkommunikationsdienst. Ursprünglich mit einer speziellen Datenkompressionstechnik für die Übertragung von Sprache optimiert, kann auch eine Datenübertragung mit 9,6 kBit/sec und ein Short Message Service (SMS) mit Datenpaketen von 160 Byte durchgeführt werden. Beim SMS kann die Zentrale sowohl einzelne Benutzer wie auch Benutzergruppen adressieren. Die GSM-Dienste arbeiten in Deutschland in den Frequenzbereichen 900 MHz und 1800 MHz. Die Bedeckung wird von den Netzbetreibern für Deutschland mit >98% der Bevölkerung angegeben, d.h die flächenmäßige Abdeckung in ländlichen Gebieten ist nicht gegeben. Mit Hilfe von technischen Erweiterungen (2.5G), wie z. B. des *High Speed Circuit Switched Data* (*HSCSD*) kann der Datendurchsatz im GSM-Netz durch bessere Kodierungsverfahren und Kanalbündelung gesteigert werden. Mehrere Slots à 14,4 kBit/sec werden von einem Benutzer belegt. In der Regel können vier Kanäle gebündelt werden, was zu Datenraten von 57,6 kBit/s führt. Beim *General Packet Radio Service* (*GPRS*) werden die Daten in Pakete aufgeteilt und über alle acht Slots einer GSM-Leitung mit 21,4 kBit/sec geführt. Dadurch ist eine maximale Leistung von 170 kBit/sec möglich. In der Praxis werden pro Funkkanal aber nur ca. 14 kBit/s erreicht, außerdem steht je nach Übertragungsrichtung eine unterschiedliche Anzahl an Kanälen zur Verfügung. Dies hängt von der verwendeten Hardware und der Auslastung in der Funkzelle ab. Typische Datenraten beim Empfang sind ca. 50 kBit/s und beim Senden von ca. 30 kBit/s. Die dritte Mobilfunkgeneration (3G) ist durch die Einführung des neuen Standards *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunications System*) gekennzeichnet. Basierend auf der GPRS Kernarchitektur wird mittels UMTS eine Erhöhung der Datenrate bis zu 2 Mbps erreicht. Es wird allerdings keine flächendeckende Versorgung mit dieser Datenrate geben, da diese von der Nutzung eines bestimmten Zelltyps und der Geschwindigkeit des Nutzers abhängt, wie in der Abbildung 3-15 und der Tabelle 3-6 dargestellt wird. Seit dem Jahr 2004 ist UMTS vor allem in den Ballungsräumen nutzbar, während auf dem Land teilweise noch erhebliche Lücken in der Abdeckung existieren.

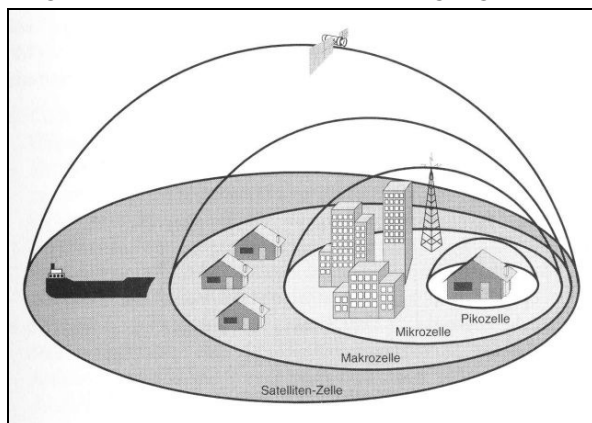


Abbildung 3-15: UMTS Zellen [ROTH 2002]

Zelltyp	Größe	Geschwindigkeit	Datenrate	Geogr. Ort
Piko	< 50 m	10 km/h	2 MBit/s	Gebäude
Mikro	< 20 km	120 km/h	384 kBit/s	Stadtteil
Makro	< 100 km	500 km/h	144 kBit/s	Land
Satellit	Kontinent	1000 km/h	< 384 kBit/s	Kontinent

Tabelle 3-6: Kenngrößen UMTS-Zellen

☞ *Satellitenkommunikation*

Dachte man früher bei Satellitenkommunikation an große, schwere und evtl. auf Satellitenschüsseln angewiesene Hardware, so stehen heute tragbare Modems oder Satellitentelefone im „Handyformat“ für die mobile Datenkommunikation zur Verfügung. Vorausgesetzt es besteht eine ausreichende Sichtverbindung zu dem Satelliten bietet sich der Einsatz dieser Systeme vor allem in Gebieten ohne Mobilfunknetze an. Die Satellitenkommunikationssysteme lassen sich nach der Art der Umlaufbahn der verwendeten Satelliten in *GEO*-, *MEO*- und *LEO*-Systeme (*Geostationary* -, *Medium* – oder *Low Earth Orbit*) unterteilen. *GEO*-Satelliten befinden sich in einer Höhe von ca. 36 000km über der Erde. Ihre Umlaufzeit ist der Erddrehung derart angepasst, dass sie sich quasi stationär über einem bestimmten Punkt auf der Erdoberfläche befinden. Die Abdeckungsfläche (sog. *Spotbeam*) von *GEOs* erstreckt sich über ein Areal von kontinentaler Ausdehnung. Bekanntester Anbieter ist die englische Firma Inmarsat Group Ltd.. Sie operiert mit 10 Satelliten, die die Erdoberfläche mit Ausnahme der Pole versorgen. Je nach verwendeter Hardware werden verschiedene Dienste (Datenraten) angeboten. Die wichtigsten Datendienste sind *Global Area Network (GAN)* und *Regional Broadband Global Area Network (BGAN)*. *GAN* ist ein mobiler ISDN-Satelliten-Anschluss für hochqualitative Sprach- und Datendienste bis 64 kBit/s, während *BGAN* einen reinen Datendienst mit Geschwindigkeiten bis zu 144 kBit/s darstellt. Ein weiterer Anbieter von Datendiensten via *GEO*-Satelliten ist der arabische Satellitennetzbetreiber Thuraya. Er versorgt mit 2 geostationären Satelliten weite Teile von Europa, Afrika sowie Asien und bietet das z. Zt. leichteste und kleinste Satellitenhandy, an das in Europa verwendet werden kann. Es unterstützt GSM 900 und Thuraya. Alle GSM Dienste wie SMS, Daten- (bis 9,6 kBit/s) und Faxübertragung sind auch im Satellitenmodus verfügbar. Der Nachteil von geostationären Satelliten ist, dass sie in Mitteleuropa nur unter einer sehr niedrigen Elevation (< 40°) sichtbar sind, was oft zu Abschattungsproblemen führt. *MEO*- Satelliten befinden sich in einer Höhe von ca. 3 200-16 000km. Die Umlaufzeiten betragen dabei ca. 6 Stunden. Gegenwärtig steht kein *MEO* System für Kommunikationszwecke zur Verfügung. *LEO*-Systeme bestehen aus Satelliten in einer Höhe von < 200 - 2000 km. Die Umlaufzeiten betragen ca. 105 Minuten. Der *Spotbeam* von *LEO*-Satelliten deckt eine Fläche von ca. 400-600 km Durchmesser ab. Gegenüber *GEO*- und *MEO*-Systemen ermöglichen *LEOs* aufgrund der niedrigen Umlaufbahnen eine geringere Sendeleistung der Satelliten und die Verwendung kleiner Endgeräte. Neben der seit 1998 auf dem Markt befindlichen Firma Iridium, die als einziger Anbieter eine globale Verfügbarkeit und Datendienste mit 2,4 – 10 kBit/s anbietet, ist noch die Firma Globalstar zu nennen, die Satellitenhandys mit einer Datenrate von 9,6 kBit/s im Satellitenmodus und Roaming in GSM 900 Netze im Programm hat.

Neben der Netz- oder Signalverfügbarkeit, Roaming-Angebot, geeigneten mobilen Endgeräten und den anfallenden Gebühren ist vor allem die anwendungsgerechte Übertragungskapazität ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl des richtigen mobilen Datenkommunikationsmediums. Die Tabelle 3-5 gibt einen Überblick von verschiedenen Daten und die dafür benötigte Übertragungszeit bei max. Datenrate.

Daten	Größe	GSM	Festnetz	ISDN	GPRS	UMTS	SatKom
Webseite	9 kB	8 s	3 s	1 s	0,6 s	0,04 s	0,5 s
Kleine Textdatei	40 kB	33 s	11 s	5 s	3 s	0,2 s	2,2 s
Große Textdatei	2 MB	28 min	9 min	4 min	2 min	8 s	2 min
Videoclip	4 MB	56 min	18 min	8 min	5 min	16 s	4 min

Tabelle 3-7: Übertragungszeiten verschiedener Kommunikationstechniken

Die Entwicklung weiterer Funktechniken schreitet zügig voran, so dass bereits heute schon an der Einführung von neuen Standards gearbeitet wird. Hierzu zählen beispielsweise die BT-Erweiterung *Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate)* mit Netto-Datenübertragungsraten von bis zu 240 KByte/s, die WLAN ähnliche Technik *WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access)* mit einer Datenübertragungskapazität von bis zu 70 MBit/s über Entfernungen bis zu 50 km oder die neuen Mobilfunkstandards *HSDPA/3G (High Speed Downlink Packet Access)* sowie *HSUPA/3G (High Speed Uplink Packet Access)* mit Brutto-Datenübertragungsraten von 5,8 – 14,4 MBit/s. Einen guten Überblick hierzu findet sich in [ZIVADINOVIC 2005]. Auch die Kapazitäten der Satellitenkommunikation sollen ausgebaut werden. So hat die Firma Inmarsat im Jahr 2005 damit begonnen, mit Hilfe der neuen Satellitengeneration Inmarsat-4 den regionalen *BGAN Service* global auszubauen, wodurch die Datenrate auf bis zu 432 kBit/s gesteigert werden soll. Auch Thuraya plant den Ausbau ihrer Dienste durch den Einsatz eines neuen (dritten) Satelliten, der bereits bei Boeing in Auftrag gegeben wurde.

3.4. Positionierungs- und Lokalisierungssysteme

Spricht man von einer *Position*, so ist damit der Standort im Raum oder im Gelände gemeint, der durch ein Koordinatenpaar oder –tripel exakt bestimmbar ist. Oft wird in diesem Zusammenhang auch von einer *Lokalisation* gesprochen, die sich aber dadurch unterscheidet, dass hier eine Ortsbestimmung unter Berücksichtigung von Umgebungsinformationen erfolgt. Der mögliche Standort wird mit Hilfe dieser Informationen eingegrenzt bzw. örtlich beschränkt und letztendlich lagemäßig zugeordnet. Nach [WUNDERLICH 2003] kann in diesem Fall auch von einer *Geolokalisation* gesprochen werden.

3.4.1. Systemüberblick

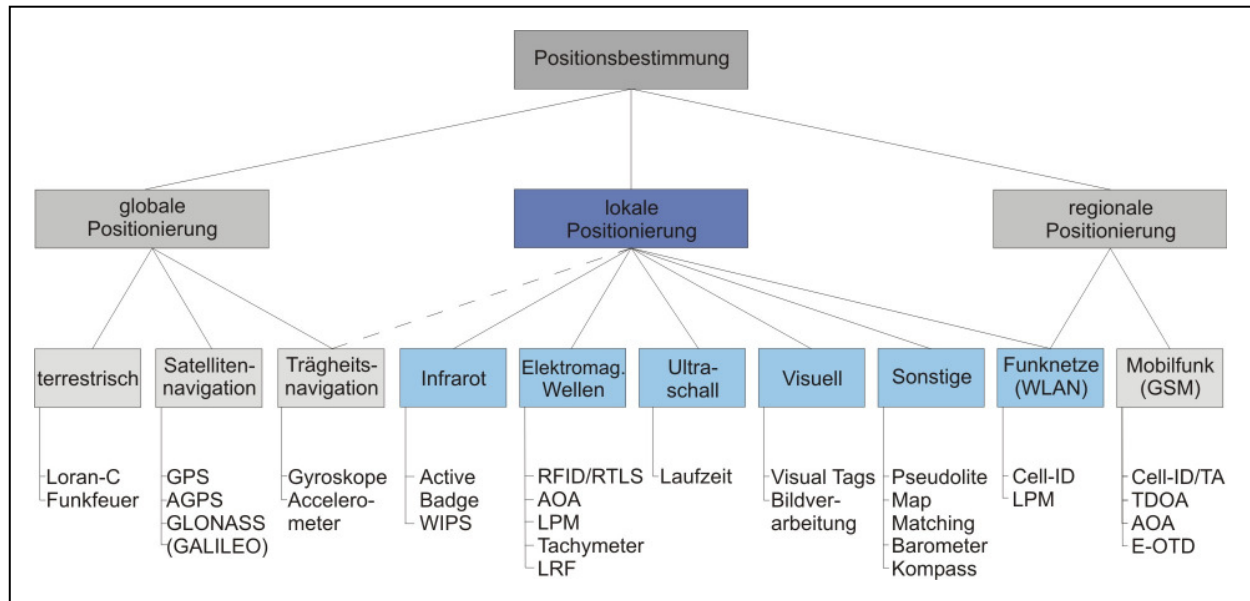


Abbildung 3-16: Überblick Positionierungssysteme [nach SCHÄFER 2003]

Will man die aktuellen und in der Entwicklung befindlichen Positionierungssysteme klassifizieren, so können hierfür unterschiedliche Kriterien herangezogen werden (z. B. die Art der Positionierungsmethode (aktiv/passiv oder absolut/relativ), Genauigkeitsklassen oder Preiskategorien). In der Abbildung 3-16 wurden mögliche Sensorsysteme für raumbezogene mobile Informationssysteme zunächst nach der räumlichen Abdeckung und anschließend nach unterschiedlichen Techniken, Messverfahren und Medien strukturiert. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, denn im weitesten Sinne stellt auch der Nutzer selbst über die Wahrnehmung und Verarbeitung von Umgebungsinformationen durch die menschlichen Sinne ein „Lokalisierungssystem“ dar. Hierdurch ergeben sich weitere Möglichkeiten der Positionierung, mit unterschiedlicher räumlicher Dimension in der Reichweite, wie beispielsweise das in dem Kapitel 2.1.1 beschriebene *Geokoding*.

Eine weitere Methode, die Positionierung mit Hilfe von raumbezogenen Daten lokal zu unterstützen bzw. zu verbessern, stellt das *Map Matching* Verfahren dar [CZOMMER, MÖHLENBRINK 1999]. Die Funktionsweise dieses Verfahrens wird vor allem in der Verkehrstelematik eingesetzt (z. B. bei Fahrzeugnavigationssystemen). Durch Map-Matching wird die aus Informationen der Navigationssensoren (GPS, Koppelnavigationssensoren) berechnete Position mit der digitalen Karte abgeglichen und ggf. kalibriert. Führt das Fahrzeug z. B. eine scharfe Rechtskurve aus und verzeichnet die digitale Straßenkarte in der Umgebung der berechneten Position nur eine Abbiegemöglichkeit so wird die Position des Fahrzeugs auf die Koordinaten dieser Straßenkreuzung kalibriert. Dieses Verfahren ist auch auf den charakteristischen Verlauf einer Straße anwendbar. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass eine Datenbasis mit geeigneten Informationen existiert. Die digitale Straßendatenbank enthält neben der Geometrie und Attributierung des Straßennetzes zusätzliche Informationen wie z. B. Abbiegebeschränkungen, Einbahnstraßen, etc.. Durch geeignete Map Matching Algorithmen, wie z. B. das Winkelbildverfahren [CZOMMER 2001], lassen sich punktuell hohe Genauigkeiten von 0.5 -1 m in der Positionsbestimmung erreichen. Die Funktionsweise des Map Matching Verfahrens wird in der Abbildung 3-17 auf der folgenden Seite verdeutlicht.

Dieser klassische Ansatz des Map Matching Verfahrens kann in dieser Arbeit nicht angewendet werden, da die Zielapplikation von SmobGIS im ländlichen, unwegsamen Gelände liegt, und somit keine geeignete vektorielle Datenbasis vorausgesetzt werden kann. Hier ist ein neuer, innovativer Ansatz notwendig, der Geodaten verwendet, die auch in diesen Örtlichkeiten vorliegen. In dem Kapitel 6 wird deshalb ein neues Matching Verfahren vorgestellt, das die sensorgestützte Positionsbestimmung vor Ort erfolgreich unterstützen kann. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Positionierung mit Sensoren liegt, wird in den folgenden Abschnitten kurz auf die wesentlichen Sensortechnologien für eine Positionsbestimmung eingegangen.

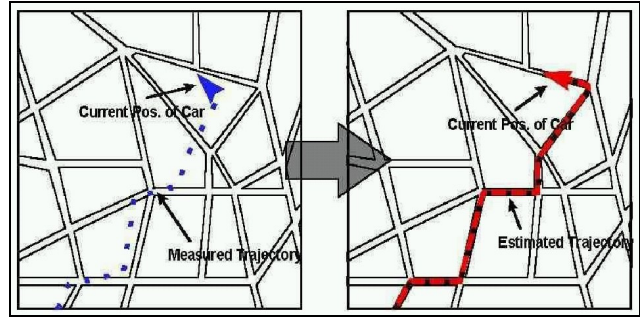


Abbildung 3-17: Prinzip Map Matching [SCOUT 2004]

3.4.2. Globale Navigation

3.4.2.1. Satellitenpositionierung

Die Systeme für die globale Positionierung und Navigation mit Satelliten werden unter dem Obergriff *Global Navigation Satellite System (GNSS)* zusammengefasst. Der Begriff drückt das Ziel aus, ein weltweit verfügbares und zuverlässiges Satellitensystem aufzubauen, das aus mehreren, interoperablen Einzelsystemen besteht. Derzeit sind das US-amerikanische *NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System)* und das russische *GLONASS (GLOBAL NAVigation Satellite System)* in Betrieb, die zusammen mit ihren satellitenbasierten Ergänzungssystemen EGNOS, WAAS und MSAS auch als GNSS-1 bezeichnet werden. Der Begriff GNSS-2 definiert die zukünftigen integrierten Satellitennavigationssysteme unter Beteiligung des europäischen Satellitenpositionierungssystems *GALILEO*. GPS und GLONASS sind in ihrer Struktur ähnlich aufgebaut und beinhalten ein Raum-, Kontroll- und Nutzersegment. Jeder dieser Bereiche umfasst eine eigene Hard- und Software sowie eine spezielle Organisation, die hier nicht im Detail beschrieben werden sollen. Ausführliche Informationen dazu finden sich in der zahlreichen GNSS-Literatur, z. B. in [KAPLAN 1996], [MANSFELD 1998] oder [LEICK 2004].

☞ GPS

Die 24 Satelliten des GPS-Raumsegments senden kontinuierlich Signale auf den beiden Trägerfrequenzen L1 und L2 aus (s. Abb. 3-18). L1 überträgt den hochgenauen *Precision Code (P-Code)* und den weniger genauen *Coarse/Acquisition Code (C/A-Code)*. Auf L2 wird derzeit lediglich der P-Code ausgestrahlt. Die zeitabhängig generierten, pseudo-stochastischen Codes ähneln einem Rauschsignal und werden daher auch als *Pseudo Random Noise (PRN)* bezeichnet. Neben den PRN Codes werden dem Trägersignal auch Informationen über die Systemzeit, die Satellitenpositionen, dem Uhrfehler sowie Angaben über den Health-Status der Satelliten aufmoduliert. Der C/A-Code steht für zivile Nutzer zur Verfügung, wobei die Bereitstellung dieses Codes als *Standard Positioning Service (SPS)* bezeichnet wird. Der P-Code dient ausschließlich der autorisierten (militärischen) Verwendung und wird nur von speziellen Empfängern ausgewertet (*Precise Positioning Service (PPS)*). Um eine künstliche Verfälschung der Signale zu erschweren, wird der P-Code zum sog. Y-Code verschlüsselt, was als *Anti-Spoofing (A-S)* bezeichnet wird.

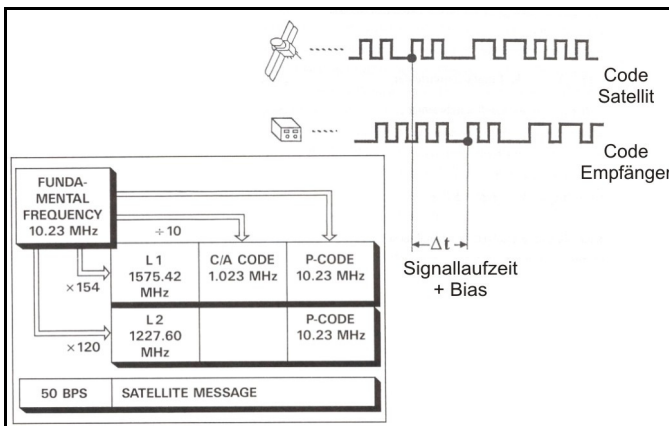


Abbildung 3-18: GPS-Signale u. Korrelation [ILLNER 1995]

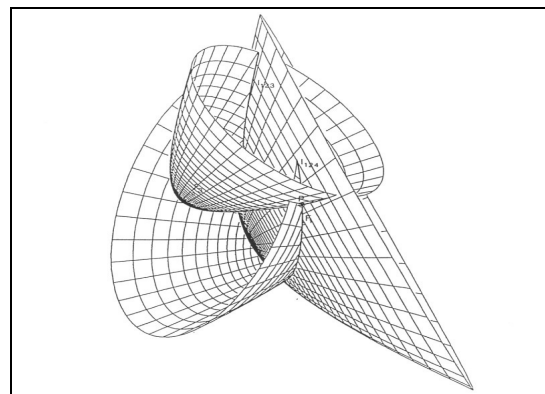


Abbildung 3-19: GPS-Positionslösung als Schnittpunkt von Hyperboloiden [WUNDERLICH 1993]

Das grundlegende Prinzip der GNSS-Positionsbestimmung beruht auf Laufzeitmessungen zwischen den Satelliten und der Empfängerantenne. Diese ergibt unter Berücksichtigung der Signalausbreitung mit der Lichtgeschwindigkeit die Entfernungen zu den jeweiligen Satelliten. Wie in Abbildung 3-19 dargestellt, wird die gesuchte Position der Empfängerantenne im Raum durch den Schnittpunkt von Hyperboloiden definiert, deren Brennpunkte die Satellitenörter bilden. Die Anzahl der benötigten Entfernungsmessungen wird durch die Anzahl der zu lösenden Unbekannten bestimmt. Neben den unbekannt geozentrischen Koordinaten des Empfängers tritt ein unbekannter Zeit-Off-Set zwischen den hochgenauen Atomuhren der Satelliten und der weniger genauen Quarzuhr im Empfänger auf. Für die Bestimmung einer 2D-Position werden Messungen zu mindestens drei Satelliten, für die Bestimmung einer 3D-Position Messungen zu mindestens vier Satelliten sowie die aktuellen Satellitenpositionen zum Zeitpunkt der Messung im GPS-Koordinatensystem WGS84 benötigt. Jeder Satellit sendet daher kontinuierlich seine Orbitdaten (Ephemeriden) und die der anderen Satelliten (Almanach) über die *Satellite Message* aus. Weiterhin muss der Sendezeitpunkt des Signals bekannt sein. Dies wird dadurch erreicht, dass im Empfänger zeitgleich (abgesehen vom Uhren-Offset) ein zu den Satelliten identischer Code erzeugt wird. Da es sich bei GPS um ein *Code Division Multiplex Access (CDMA)*-Verfahren handelt, sendet jeder Satellit auf der gleichen Frequenz einen unterschiedlichen Code (PRN) aus. Über eine Kreuzkorrelation wird der empfangene PRN mit dem empfängerintern erzeugten PRN überlagert, bis eine optimale Übereinstimmung erzielt wird (s. Abb. 3-18). Aus der Verschiebung der beiden Codes zueinander lässt sich die Laufzeit des Signals inklusiver diverser Fehlereinflüsse ermitteln. Hierzu zählen neben Ausbreitungsfehler in der Atmosphäre vor allem Uhrenfehler, so dass sich aus der Multiplikation der Laufzeit mit der Lichtgeschwindigkeit nicht die wahre geometrische Entfernung zum Satelliten resultiert, sondern die sog. *Pseudorange*.

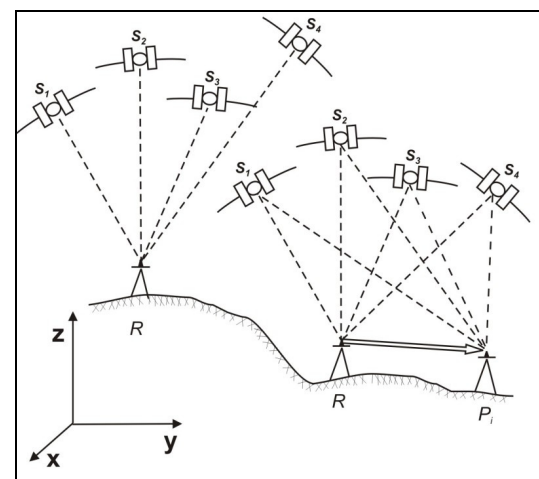
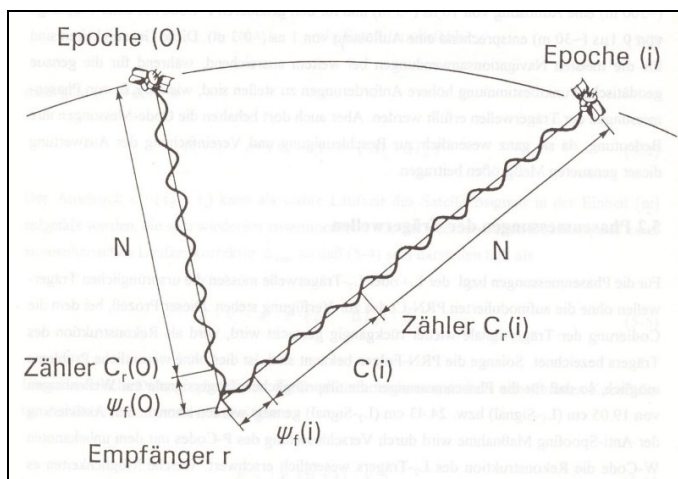


Abbildung 3-20: GPS-Phasenmehrdeutigkeit [SCHERRER 1987] Abbildung 3-21: GPS-Positionierungsverfahren

Neben der Messung des Codes kann auch die Trägerphase des GPS-Signals nach Beseitigung der Signalmodulation ausgewertet werden. Hierbei ist die eigentliche Messgröße die Phase der Schwingungswelle Ψ_f , die sich als Differenz der Phase des vom Satelliten ausgesandten Trägersignals und der Phase des im Empfänger r erzeugten Referenzsignals ergibt. Ein wesentlicher Unterschied zu den eindeutigen Code-Messung besteht darin, dass bei Phasenmessungen nur ein Bruchteil der Gesamtentfernung innerhalb des letzten Wellenzuges ausgemessen wird (s. Abb. 3-20). Erst durch Addition einer zum Messbeginn unbekannt Anzahl ganzer Wellenlängen N , den Phasenmehrdeutigkeiten (*Ambiguities*), erhält man die Gesamtentfernung zwischen Satellit und Empfänger. Die Änderung in der Anzahl ganzer Wellenlängen wird nach Beginn der Messung durch einen Zähler C erfasst, so dass nur eine Ambiguity-Unbekannte für die Phasenmessung pro Satellit in die Positionsberechnung auf Basis spezieller Ausgleichungsverfahren eingeführt werden muss. Dieses Messprinzip setzt allerdings voraus, dass das Satellitensignal kontinuierlich empfangen wird. Erfolgt eine Unterbrechung des Signals, dann kann die Anzahl ganzer Wellenlängen nicht mehr erfasst werden und es tritt ein sog. Phasensprung auf (*cycle slip*). Um die Einführung einer neuen Ambiguity-Unbekannte zu vermeiden, wird in der Praxis versucht, die cycle slips zu bestimmen und als Korrektur an die Beobachtungen anzubringen. Der Vorteil der Phasenmessungen liegt in der hohen Messgenauigkeit der L_1 -/ L_2 -Trägerwelle von rund 1-2 mm, während beim C/A-Code ca. 3 m und beim P-Code ca. 0,3 m erreichbar sind. Grundsätzlich müssen bei der GPS-Positionsbestimmung die beiden Messverfahren der *absoluten* und *relativen Positionierung* unterschieden werden (s. Abb 3-21). Eine

absolute Positionierung erfolgt durch die simultane Messung *eines* Empfängers R zu mindestens vier Satelliten S_i . Das Verfahren dient in der Regel der Navigation und weist eine Genauigkeit von $\sigma_R = \pm 10$ m auf, die heute auch mit relativ preiswerten GPS-Handempfängern zu erreichen ist. Bei höheren Genauigkeitsansprüchen verwendet man relative Messverfahren zwischen einem Referenzempfänger R und einem Rover P_r , die jeweils die Signale von denselben mindestens vier Satelliten empfangen. Dieses Verfahren dient der Bestimmung von Raumvektoren (*Basislinien*) zwischen Referenz- und Roverempfänger, die im Falle der nachträglichen Auswertung (*PostProcessing*) von Phasenmessungen eine Genauigkeit von $\sigma_{RP} = \pm 3$ mm + 0,5 ppm aufweisen können. Sendet die Referenzstation ihre empfangenen Daten über ein Kommunikationsmedium direkt an den Rover (z. B. Datenfunk, GSM, Radio), dann ist bereits in Echtzeit eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von 0,5-3 m mit Code-Beobachtungen (*sog. Differential GPS = DGPS*) und bis zu 1 cm mit Trägerphasen (*sog. Real-Time Kinematic (RTK)-GPS oder Precise Differential = PDGPS*) möglich. Die GPS-Positionierung stellt derzeit die am weitesten verbreitete Methode zur Positionsbestimmung beim Einsatz von mobilen GIS dar. In Kapitel 5 wird daher im Detail auf die verschiedenen Messgrößen, Beobachtungsverfahren und Fehlereinflüsse eingegangen, die speziell beim Einsatz dieser Positionierungstechnologie für forstliche Applikation relevant sind.

☞ *Assisted GPS (AGPS)*

Unter AGPS versteht man ein Verfahren, bei dem durch die Übertragung von GPS-relevanten Informationen über ein geeignetes Medium eine Positionierung über Satelliten auch unter extremen Abschattungsbedingungen möglich ist (z. B. in Gebäuden). Bei diesen Informationen handelt es sich u. a. um die Satellitenephemeriden und den Sendezeitpunkt des Satellitensignals. Die Demodulation dieser auf der Trägerwelle aufmodulierten Informationen kann nur bei ausreichender Signalstärke erfolgen, zudem muss der Vorgang nach jedem Verbindungsabbruch wiederholt werden. Daher verarbeitet ein AGPS-Empfänger lediglich den C/A-Code und keine Satellite Message. Diese fehlenden Informationen werden in aufbereiteter Form z.B. über das Mobilfunknetz oder vorab durch Download bei einem GPS-Dienst [PREIS 2005] zur Verfügung gestellt. AGPS-Chips neuester Generation sind mit über 200.000 Echtzeit-Korrelatoren ausgestattet [SIRF 2005], so dass sie in der Lage sind, den Zeitversatz des C/A-Codes wesentlich schneller zu bestimmen. Der Zeitgewinn wird für die Signalintegration verwendet. Der Chip kann somit auch Bruchstücke des C/A-Codes nutzen und die Stärke der von Haus aus schwachen GPS-Signale künstlich erhöht werden. Die gesteigerte Sensibilität des Empfängers ermöglicht den Kontakt zu mehr Satelliten als bei herkömmlichen GPS-Empfängern und einen Signalempfang innerhalb von Gebäuden, so dass man auch von *High Sensitivity-GPS* spricht. Neben *Sirf* entwickeln noch Firmen wie *Global Locate* oder *SnapTrack* neue AGPS-Chips. Allerdings erfolgt bei *SnapTrack* die endgültige Positionsbestimmung beim Betreiber des Mobilfunknetzes, während bei *Global Locate* und *Sirf* die Positionsbestimmung direkt im Mobiltelefon erfolgt. AGPS funktioniert in diversen Mobilfunknetzen und erreicht Genauigkeiten von 5 – 10 m bei optimalen Bedingungen und noch 50 – 100 m unter schwersten Bedingungen. Einen aktuellen Überblick findet man in [WIESER, HARTINGER 2006] und [WUNDERLICH et al. 2006].

☞ *GLONASS*

GLONASS wird von den Raumstreitkräften der Russischen Föderation betrieben. Das Raumsegment bestand ursprünglich aus 24 Satelliten, die in drei Umlaufbahnen in einer Höhe von 19133 km angeordnet sind (GPS hat 6 Umlaufbahnen in 20000 km Höhe). Das Funktionsprinzip ist mit GPS vergleichbar, wobei in den letzten Jahren nur etwa die Hälfte der Satelliten zur Verfügung stand und die Zukunft des Systems als unsicher galt. Im Jahr 2003 wurde allerdings ein Modernisierungsprogramm beschlossen, das für das Jahr 2008 die Verfügbarkeit von 18 Satelliten und den vollen Operationsstatus mit 24 Satelliten das Jahr 2011 vorsieht. Der aktuelle Status kann unter www.glonass-center.ru abgefragt werden. GLONASS benutzt im Gegensatz zu GPS den gleichen Code für alle Satelliten, allerdings auf unterschiedlichen Frequenzen. Man spricht in diesem Fall von *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*. Weitere Unterschiede zwischen GPS und GLONASS liegen im verwendeten geographischen Bezugs- und Zeitsystem. GLONASS-Positionsdaten werden im *Parametry Zemli 90-System (PZ)* angegeben und beziehen sich auf die Zeitreferenz *Universal Time Coordinated–Soviet Union (UTC-SU)*, wobei eine Umrechnung in die GPS-Referenzsysteme möglich ist. Wie GPS bietet GLONASS einen militärischen Service (*Channel of High Accuracy, CHA*) und einen zivilen Service (*Channel of Standard Accuracy, CSA*), der bei voller Satellitenkonstellation ähnliche Positionsgenauigkeiten liefern soll wie GPS. Zur Zeit liegt der Nutzen von GLONASS vor allem in der kombinierten Nutzung mit GPS, die mit einigen wenigen (meist hochpreisigen) Produkten möglich ist und eine höhere Satellitenverfügbarkeit liefert.

☞ EGNOS, WAAS, MSAT

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) ist ein Gemeinschaftsvorhaben der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), der Europäischen Kommission und der Europäischen Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (Eurocontrol) und stellt Europas Beitrag zum GNSS 1 sowie einen Vorläufer von GALILEO dar. Es gehört zu der Gruppe der *Satellite Based Augmentation Systems (SBAS)*, welche in verschiedenen Teilen der Erde entwickelt wurden bzw. werden und miteinander kompatibel sein sollen. Hierzu zählen das WAAS (*Wide Area Augmentation System*) der USA, das MSAS (*Multi-Functional Satellite Augmentation System*) der asiatischen Länder (vor allem Japan) und EGNOS (s. Abb. 3-22).

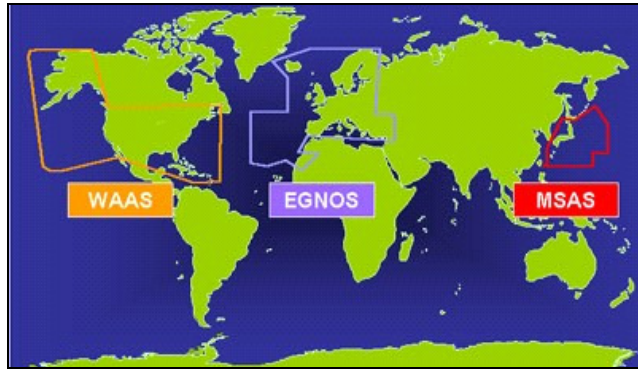


Abbildung 3-22: Abdeckung SBAS-Systeme [ESA 2004]

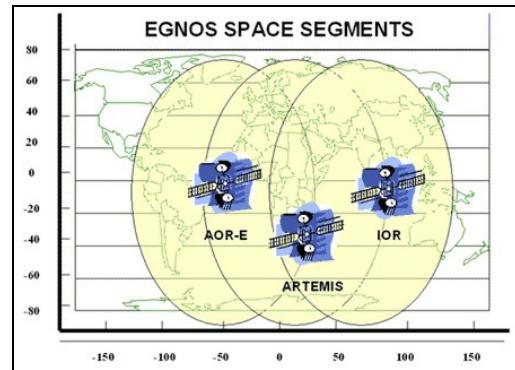


Abbildung 3-23: EGNOS Raumsegment [ESA 2004]

Ausschlaggebend für die Entwicklung von EGNOS ist die Tatsache, dass die zur Verfügung stehenden GPS und GLONASS-Signale für sicherheitskritische Navigations-Anwendungen nicht genau und zuverlässig genug sind. Vor allem bieten sie keine Möglichkeiten, den Nutzer rechtzeitig über Fehler oder Ausfälle zu benachrichtigen (Integritätsinformationen). EGNOS soll diese Lücke schließen und sowohl die Genauigkeit (1-5 m) als auch die Zuverlässigkeit erhöhen (Warnung innerhalb von 6 Sekunden). Hierzu werden über ein Netz von 34 Bodenstationen (sog. *RIMS*) Code- und Phasenmessungen mit GPS- und GLONASS-Satellitensignalen (später auch Galileo) durchgeführt, voranalysiert und zu einer der vier *Master Control Centre* gesendet. Dort erfolgt neben der kontinuierlichen Systemüberwachung vor allem die Berechnung der EGNOS-Korrekturen, die u.a. den Langzeitfehler der Satellitenposition, Kurz- und Langzeitfehler der Satellitenuhren, aktuelle Ionosphären Daten für das Gebiet und Integritätsinformationen enthalten (weitere Details s. [ESA 2005]). Anschließend werden GPS-ähnliche Signale (L1-Trägerphase) generiert und an drei geostationäre Satelliten gesendet (s. Abb. 3-23), die sie über ein spezielles Transpondersystem in das vorgesehene Abdeckungsgebiet abstrahlen und mit modifizierten (EGNOS fähigen) GPS/GLONASS-Empfängern genutzt werden können. Das System bietet somit die drei Services *GEO-Ranging* (Messung des GPS-ähnliches Signals als zusätzliche Code-Pseudorange), *GNSS Integrity Channel* (Nutzen der Integritätsinformationen als Qualitätsparameter) und das *Wide-area differential GNSS* (Verwendung der EGNOS-Korrekturen für höhere Genauigkeiten) an.

☞ GALILEO

Das geplante europäische Satellitennavigationssystem GALILEO wird 30 Satelliten umfassen, die auf 3 Umlaufbahnen in ca. 23000 km Höhe verteilt sind und ab ca. 2010 zur Verfügung stehen sollen. Das Funktionsprinzip von GALILEO ist mit GPS und GLONASS vergleichbar. Im Gegensatz zu GPS und GLONASS steht GALILEO aber unter ziviler Kontrolle und sendet auch Integritätsinformationen aus, d.h. GALILEO kann auch für sicherheitskritische Anwendungen (z.B. in der Luftfahrt) eingesetzt werden. Die Galileo Signale werden die vier Frequenzen E5a, E5b, E6 und L1 aus dem Frequenzbereich des L-Bandes nutzen, wobei alle Satelliten identische Trägerfrequenzen haben. Die Unterscheidung erfolgt durch unterschiedliche PRN-Impulsfolgen. Die Signale beinhalten Ranging Codes sowie Positions- und Datenmeldungen, wie beispielsweise Informationen der Satellitenuhr, Ephemeriden und Integritätsmeldungen. Unabhängige Integritätsnetze sollen die Integritätsinformationen erzeugen. Die Warnung, ob die vorhergesagte *Signal in Space Accuracy (SISA)* innerhalb der Anforderungen liegt und somit verwendbar ist, wird in Echtzeit mittels eines *Integrity Flags* im Navigationssignal an den Nutzer übermittelt. SISA sagt hierbei den Fehler bezogen auf die Satellitenephemeriden sowie die Uhren voraus. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die geplanten, nur auf GALILEO basierenden Dienste und ihrer Eigenschaften. Grundsätzlich wird GALILEO auch interoperable mit GPS und GLONASS sein.

	Open Service (OS)	Commercial Service (CS)	Public Regulated Service (PRS)	Safety of Live Service (SoL)	Search and Rescue (SAR)		
Merkmale	- kostenfrei - globale Navigation	- kostenpflichtig - hohe lokale Genauigkeit - professionelle Applikation	- zusätzlich Integrität - verschlüsselt, reguliert - BOS-Dienste	- kostenfrei - OS ergänzt um Integrität	Weiterleitung Notrufsignal (Cospas-Sarsat)		
Abdeckung	Global	Global Lokal	Global Lokal	Global	Global		
Genauigkeit	2 Frequenzen: hor. = 4 m vert. = 8 m 1 Frequenz: hor. = 15 m vert. = 35 m	2 Frequenzen: < 1 m	Lokale Korrekturen: < 10 cm	hor. = 6,5 m vert. = 12 m	Lokale Korrekturen: 1m	2 Frequenzen: 4- 6 m 1 Frequenz: 12-22 m Alarmfunktion	Genauere Ortsangabe < 100 m Kein Navigationsdienst
Verfügbarkeit	99,5 %	99,8 %	99,9 %	99,8 %	k. A.		
Integrität	Nein	Value-added Service	Ja	Ja	Rückkanal		

Tabelle 3-8: GALILEO Dienste [nach RÜFFER, HEMMERT 2005]

3.4.2.2. Terrestrische Systeme

Hierzu sind stationäre Funkfeuer sowie Sender zur Ortung und Navigation an Bord von Flugzeugen und Schiffen zu zählen. Die Funkfeuer ermöglichen eine Peilung des Funksignals, so dass ein beliebiger Kurs von und zu einer Funkstation verfolgt werden kann. Auf Grund der niedrigen Genauigkeit eignen sie sich lediglich für großräumige Navigationsaufgaben oder als Instrumentenlandesysteme für Flugzeuge. Um die Reichweite und Verfügbarkeit zu verbessern, wurde während des Zweiten Weltkrieges *LORAN-C*

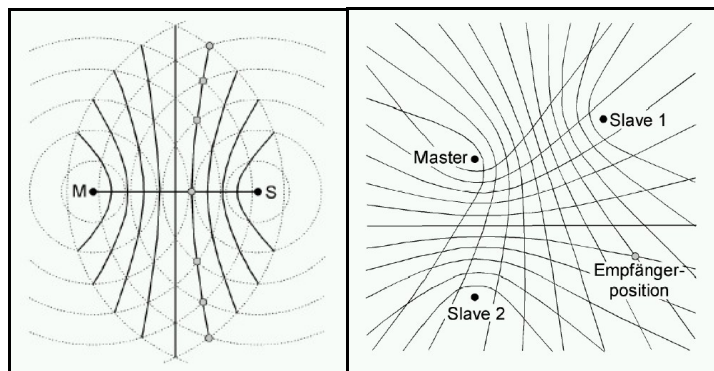


Abbildung 3-24: Hyperbel-Navigationsverfahren *LORAN-C*

(*Long Range Navigation System*) entwickelt. *LORAN-C* ist ein zweidimensionales Hyperbelnavigations-system, dessen Signal im Frequenzbereich von 90-110 kHz ausgestrahlt wird und über eine Reichweite von ca. 1000nm um die einzelnen Sendestationen verfügt. Die Sendestationen sind in Ketten mit mindestens drei und max. sechs Sendern (eine Leitstation und mehrere Nebenstationen) organisiert. Die Positionsbestimmung beruht auf der Messung von Laufzeitdifferenzen zwischen den Sendersignalen. Wie in Abbildung 3-24 dargestellt ergibt die Auswertung der Zeitdifferenzen Hyperbelstandlinien, in deren Schnittpunkt die zu bestimmende Position liegt. In Europa vereinbarten 1992 sechs Ländern den Aufbau und Betrieb des zivilen *LORAN-C* Systems *NELS* (*Northwest European LORAN-C System*) für das Gebiet Nordwesteuropas, der Nordsee und des Nordatlantiks. Seit der Inbetriebnahme einer, durch das Kontrollzentrum in Brest synchronisierten, zeitgleichen Ausstrahlung der *LORAN-C* Impulse ist auch eine Positionsbestimmung mittels des *Time of Emission Control (TOE)* Verfahrens möglich. Dies bedeutet, dass nicht nur Laufzeitdifferenzen zwischen den Signalen verschiedener Sendestationen, sondern auch die tatsächlichen Laufzeiten zwischen Sender und Empfängerantenne ermittelt werden können. Damit können (wie bei GPS) „Pseudoranges“ bestimmt und *LORAN-C* mit GPS Beobachtungen kombiniert werden, so dass selbst in Situationen in denen die beiden Einzelsysteme keine Positionslösung ermöglichen, durch eine entsprechende Nutzung der beiden Systeme eine Positionsbestimmung erfolgen kann. Auch die Kalibrierung mittels GNSS ist somit möglich [ABWERZGER 2004]. Die Genauigkeit von *LORAN-C* liegt je nach Messverfahren und Empfangsbedingungen zwischen 15 – 500m. Auf die Fortsetzung des Betriebes von *NELS* über 2005 hinaus, konnten sich die Länder leider nicht einigen, so dass der Betrieb zum 31. Dezember 2005 endet und nur noch England und Frankreich Stationen betreiben werden.

3.4.2.3. Trägheitsnavigation

Das Messprinzip eines inertialen Navigationssystems (INS) beruht auf der Wirkung äußerer Kräfte aufgrund einer Beschleunigung oder Richtungsänderung in Bezug auf den inertialen Raum. Durch Integration über die Zeit lassen sich die mit Hilfe von Gyroskopen und Accelerometern gemessenen Rotationen und Beschleunigungen in Richtung und Geschwindigkeit umrechnen. Für die Bestimmung einer dreidimensionalen Trajektorie müssen somit neben bekannter Startposition und Anfangsgeschwindigkeit sechs

Freiheitsgrade (Beschleunigung und Rotation in bzw. um jeweils drei Achsen) bestimmt werden. Die Kombination von drei Gyroskopen (Kreisel) und drei Accelerometern wird als *Strap-Down* oder *IMU* (*Inertial Measurement Unit*) bezeichnet. Bei diesem Verfahren spricht man auch von Koppelnavigation oder im englischen von *Dead Reckoning*, da sich die Messfehler – ähnlich einem einseitig angeschlossenen Polygonzug – mit ansteigender Entfernung vom Ausgangspunkt aufaddieren. Aufgrund dieser ungünstigen Fehlerfortpflanzung sind für ein zuverlässiges INS weitere Maßnahmen erforderlich. Hierzu zählen insbesondere die wiederholte Kalibrierung der Sensoren, die Modellierung auftretender Sensor-Driften sowie ein Update der aktuellen Koordinaten durch ein externes Positionierungssystem. Ein Haupteinsatzgebiet dieser Systeme ist die Navigation zu Land, Wasser und Luft im militärischen und zivilen Bereich. Für breite Anwendungen im Bereich der raumbezogenen Informationssysteme spielen inertielle Messtechniken heute aufgrund des ungünstigen zeitlichen Fehlerverhaltens (vor allem durch die Erhöhung des Rauschens durch die doppelte Integration der Beschleunigung zum Weg) und der hohen Hardwarekosten noch eine untergeordnete Rolle. Wie bereits im Kapitel 2.3.2 im Zusammenhang mit Mobile Mapping Systemen erwähnt, ist diese Thematik jedoch zurzeit Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten.

3.4.3. Regionale Netzwerke

3.4.3.1. Mobilfunkortung

Die Entwicklung von Verfahren zur Positionsbestimmung mit Hilfe der GSM-Mobilfunknetze ist in den letzten Jahren vor allem durch die Entscheidung der US-amerikanischen Kommunikationsbehörde FCC (*Federal Communications Commission*) vorangetrieben worden, wonach alle unter der Nummer 911 von Mobiltelefonen aus getätigten Notrufe lokalisierbar sein müssen (sog. Enhanced-911, E-911). Demnach müssen die U.S. Mobilfunkbetreiber bis Ende 2005 in ihrem gesamten Netz eine Positionsbestimmung bei Netzwerk-basierten Lösungen mit einer Genauigkeit von 100m (1σ)/300m (2σ) und bei „Handset“-basierten Lösungen mit einer Genauigkeit von 50m (1σ), 150m (2σ) garantieren [FCC E911 2004]. Da auch in Europa entsprechende Standards in Vorbereitung sind und andere Applikationen zunehmend Bedarf an ausreichend genauen und jederzeit verfügbaren Ortungsinformationen haben (z. B. LBS, Verkehrsstelematik oder die entfernungsabhängige Abrechnung von Mobilfunk-Leistungen) forcierte zusätzlich die Entwicklung der im folgenden kurz vorgestellten Verfahren der GSM-Mobilfunkortung. Weiterführende Informationen hierzu findet man u. a. in [INGENSAND, BITZI 2001] oder [CGALIES 2002].

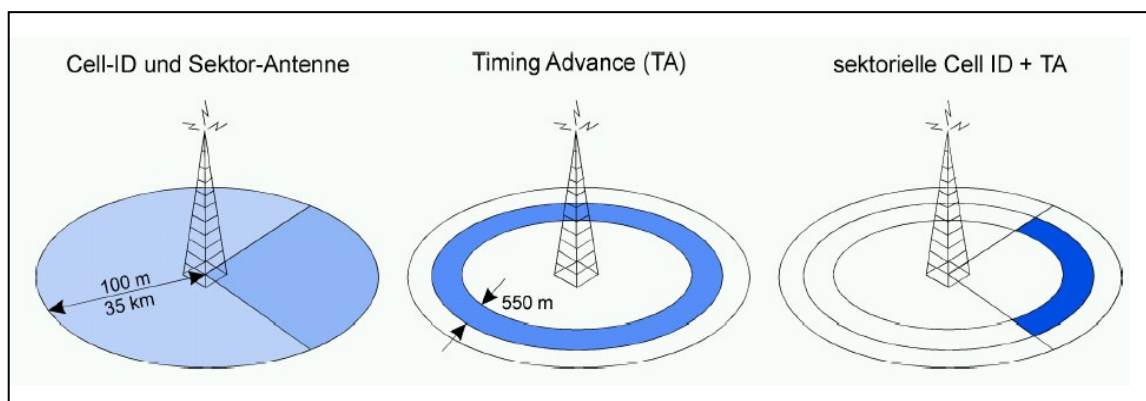


Abbildung 3-25: Zellortung in Mobilfunknetzen [nach ROTH 2002]

☞ Zellortung

GSM, GPRS und UMTS sind zellulare Kommunikationssysteme, in denen die mobilen Endgeräte zu jeder Zeit mit einer oder mehreren ortsfesten Stationen in Funkverbindung stehen. Mittels Zellenortung kann die Zelle, in der sich der Nutzer befindet, ermittelt werden. Die erreichbare Genauigkeit ist von der Zellengröße abhängig, der Radius der Zellen kann zwischen <100 m im Stadtgebiet und bis zu 35 km in ländlichen Gebieten betragen (s. Abb. 3-25). Meist besteht eine Basisstation aus mehreren Send- und Empfangsantennen, die eine Unterteilung der Zellen in Sektoren ermöglicht. Die Technik der Zellortung wird als *Cell-ID*, *Cell of Origin (COO)* oder *Cell Global Identity (CGI)* bezeichnet. Innerhalb einer Zelle kann die Position eines mobilen Nutzers durch *Timing Advance (TA)* näher eingegrenzt werden. Der TA ist eine 6-Bit Information zur Laufzeitverzögerung des Signals, die der Zuordnung eines freien Zeitslots im GSM-Signal dient. Bei einer maximalen Zellengröße von 35 km entspricht dies einem Kreisring von 550 m Breite ($35 \text{ km}/2^6$), innerhalb dessen sich der Nutzer befindet.

☞ **Hyperbelschnittverfahren**

Die bisher genaueste GSM-Positionierung basiert auf der Technik des Hyperbelschnittverfahrens durch Distanzbestimmung zu mindestens drei Antennen. Es gilt, dass sich sämtliche Punkte, deren Distanzdifférenz zu zwei anderen Punkten konstant ist, auf einer Hyperbel befinden. Bei drei Antennen ergeben sich zwei Hyperbeln, deren Schnittpunkt der gesuchten Position entspricht. Die GSM-Distanzbestimmung erfolgt wiederum nach folgenden Verfahren:

- Messung der Signalstärke (*Received Signal Strength (RSS)*)
- Laufzeitverfahren (*Time of Arrival (TOA)*)
 - ⇒ Laufzeitdifferenzen (*Time Difference of Arrival (TDOA), Advanced TDOA*)
 - ⇒ Verbesserte, zeitkorrigierte Laufzeitverfahren (*Enhanced Time Difference of Arrival (E-TDOA), Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)*)

Mit TOA bezeichnet man die Laufzeitmessung eines vom Mobiltelefon ausgesendeten Signals zu mindestens drei Basisstationen. Hierzu wird ein künstlicher Hand-Over zu mindestens zwei Basisstationen initiiert (wobei eine tatsächliche Herstellung der Verbindung nicht beabsichtigt ist und auch nicht realisiert wird). Als Voraussetzungen müssen zum einen die Positionen der Basisstationen bekannt sein, zum anderen müssen die Zeitsysteme der Basisstationen synchronisiert bzw. deren Off-Set durch *Location Measurement Units* (z. B. GPS) ermittelt und aufgezeichnet werden. Die Position des Nutzers wird im Netzwerk durch das Kreisschnittverfahren berechnet. Unter optimalen Bedingungen werden Genauigkeiten von ca. 125 m erzielt.

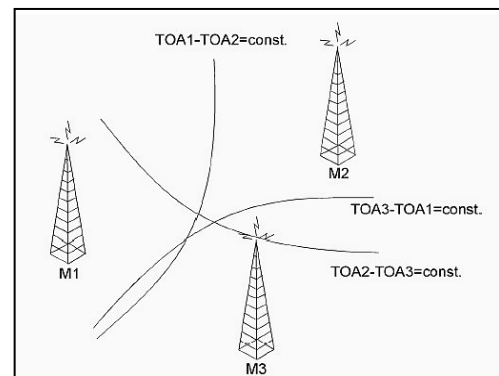


Abbildung 3-26: TDOA Verfahren

Eine weitere Verfeinerung des Laufzeitverfahrens stellt die Messungen von Zeitabständen zwischen der Signalausstrahlung durch verschiedene Basisstationen dar (s. Abb. 3-27). Anhand der Laufzeitdifferenzen (TDOA) kann die Position des mobilen Nutzers mit Hilfe des Hyperbelschnittverfahrens berechnet werden. Hierbei unterscheidet man zwischen „handset-based“- und „network-based“-Methoden. Bei der „handset-based“-Methode erfolgt die Berechnung der Position im mobilen Endgerät unter Einbeziehung von Informationen, die aus dem Netz bezogen werden (E-OTD). Die „network-based“-Methode überträgt die gemessenen Daten an das Netzwerk und die Berechnung erfolgt dort (E-TDOA). Das Ergebnis wird anschließend z.B. via SMS von der Zentrale an den Nutzer gesendet. Die Messung der empfangenen Signalstärke (RSS) ist im Vergleich zu den anderen Hyperbelverfahren die ungenaueste Methode zur Positionsbestimmung. Sie basiert auf der Tatsache, dass sich die Stärke des ausgesendeten Signals ohne Berücksichtigung von Atmosphäre oder Hindernissen quadratisch zum Abstand zwischen Sender und Empfänger abschwächt. Wenn die Ausgangsstärke bekannt ist, so kann mit bekannten Ausbreitungsmodellen die Distanz zur Antenne der Basisstation berechnet werden. Ein Nachteil ist, dass die gemessene Signalstärke von Faktoren wie der Zellsektorisierung oder dem Neigungswinkel der ausgesendeten Signale abhängt und die Feldstärkemessung nicht zwischen direkten und reflektierten Signalen unterscheiden kann.

☞ **Einfallswinkel an Antenne**

Das vierte gebräuchliche Verfahren misst den Winkel, unter dem ein Mobilfunksignal an der Antenne einfällt. Man spricht hier von *Angle of Arrival (AOA)*. Auch dieses Verfahren ist nicht so genau, da ein mechanisches Drehen einer oder mehrerer Antennen, die eine Richtungscharakteristik aufweisen und interpretieren können, an der Basisstation notwendig ist sowie der große Störeinfluss von Mehrwegeeffekten.

Allen beschriebenen Verfahren ist gemeinsam, dass die Genauigkeit der Positionierung von der geometrischen Konfiguration der Basisstationen limitiert wird, da deren Standpunkte hinsichtlich einer möglichst guten Signalabdeckung und nicht für eine optimale Positionierung ausgewählt wurden. Liegen das Mobiltelefon und die Basisstation auf einer Linie, dann versagt die Positionierung sogar. Neben Mehrwegeeffekten und Interferenzen (außer bei Zellortung) zählen zu den weiteren Einflussfaktoren [BALBACH 2000]:

- hohe Netzbelastung
- sehr niedriger Streufaktor
- keine direkte Sichtverbindung zur Basisstation

Allerdings hat der neue Mobilfunkstandard UMTS eine andere Signalstruktur als GSM, die sich positiv auf die erreichbaren Positionierungsgenauigkeiten auswirkt. In der Tabelle 3-9 sind daher die geschätzten Genauigkeiten der verschiedenen Positionierungsmethoden im Vergleich zu GSM angegeben.

Positionierungsmethode	GSM (1σ)	UMTS (1σ)
TDOA/E-OTD	50 – 150 m	5 – 20 m
AOA	100 – 200 m	100 – 200 m
TOA	~ 125 m	50 – 100 m

Tabelle 3-9: Geschätzte GSM und UMTS Positionierungsgenauigkeiten [nach RETSCHER, MOK 2001]

3.4.3.2. Drahtlose Netzwerke

Der intensive regionale Ausbau der in Kapitel 3.3 beschriebenen drahtlosen lokalen Netzwerke (WLAN) an sog. *Hot Spots* (Bereiche mit einer hohen Anzahl an potentiellen Nutzern) ermöglicht ebenfalls den Einsatz von Positionierungsverfahren. Da ein Hot Spot allerdings oftmals nur aus einem sog. *Access Point* besteht, was einer Zelle entspricht, ist das zellbasierte Verfahren nicht aussagekräftig. Ebenso erwies sich die Messung der Laufzeiten aufgrund komplexer Signalreflexionen und Mehrwegeeffekten als unzureichend. Ein drittes Verfahren nutzt eben diese Eigenschaften der Signalausbreitung. Bei dem als *Location Pattern Matching (LPM)* bezeichneten Verfahren wird die Signalstärke gemessen, die aufgrund von Signalreflexionen und Mehrwegeeffekten eine ortsabhängige Charakteristik aufweist. Vergleicht man diese Charakteristik mit zuvor ermittelten Signalstrukturen, lässt sich durch eine Art Mustererkennung der Ort des eingehenden Anrufs ermitteln. Dieses Verfahren setzt allerdings eine stets aktuelle Datenbank voraus, die bei jeder Veränderung der Umgebung mit neuen Mustervorlagen aktualisiert werden muss. Mit *LPM* lassen sich in einem WLAN Positionsgenauigkeiten von 1 - 2 m erreichen [ZUENDT et al. 2004].

3.4.4. Lokale Positionierung

3.4.4.1. Terrestrische Polarsensoren

Unter diese Rubrik fallen Sensoren für die terrestrische Messung von polaren Beobachtungsgrößen, um damit eine zwei- oder dreidimensionale Positionsbestimmung von Objekten durchführen zu können. Ausgehend von einem koordinatenmäßig bekannten Instrumentenstandpunkt P_0 werden über die gemessenen horizontalen Richtungen r_i , die Zenitwinkel z_i und die Entfernungen s_i Punktkoordinaten in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmt (s. Abb. 3-27). Hierfür bieten sich die folgenden digitalen Sensorsysteme für den Einsatz bei mobilen GIS an:

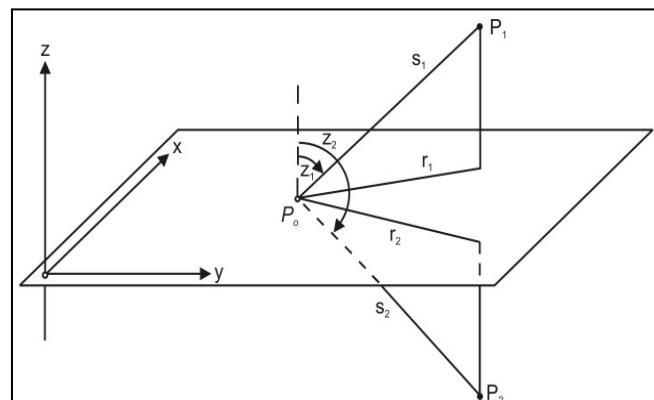


Abbildung 3-27: Polare Punktbestimmung

☞ *Tachymeter/Laserscanner*

Ein Tachymeter integriert einen digitalen *Theodolit* und einen *elektronischen Distanzmesser (EDM)* in einem einzigen Gerät. Hierbei ist die Streckenmessausrüstung meist koaxial angebracht, d.h. die Hauptachse der EDM-Signale und die Zielachse der elektro-optischen Winkelmessung sind identisch. Im Gegensatz zu satellitengestützten Verfahren, die Mikrowellen verwenden, arbeiten die hier eingesetzten elektrooptischen Distanzmesser mit Wellen des sichtbaren Lichtes oder Infrarot. Die Bestimmung der Distanz erfolgt ebenso wie bei GNSS entweder direkt aus der Laufzeit (Impulsmessung) oder indirekt über das Phasenvergleichsverfahren mit Genauigkeiten bis zu 1 mm + 1 ppm. Wesentliche Einflussfaktoren sind das verwendete Messverfahren, die Reichweite in Verbindung mit den atmosphärischen Bedingungen und die Reflexionseigenschaften des Zielpunktes (z. B. mit/ohne Reflektor). In Kombination mit der automatischen Abtastung der Horizontal- und Vertikalkreise über elektro-magnetische oder optisch-elektronische Verfahren, die eine Richtungsbestimmung < 1 mgon erlauben, können mit modernen Tachymetern Punktgenauigkeiten von wenigen mm – cm erreicht werden. Sind die Steuertriebe zum Positionieren des Fernrohrs in Horizontal- und Vertikalrichtung motorisiert, spricht man auch von *Servo-Tachymetern*. Diese Geräte erlauben eine Steuerung über Software-Befehle, so dass sie insbesondere auch für den ferngesteuerten Betrieb geeignet sind. Sie werden auch als Ein-Mann-Systeme oder Mess-Roboter

bezeichnet. Servo-Tachymeter verfügen i. d. R. auch immer über Funktionen der automatischen Zielsuche und der Verfolgung bewegter Ziele und sind deshalb ebenso in die Kategorie der selbstzielenden Tachymeter einzuordnen. Weitere Details zu den eingesetzten Technologien und Messverfahren finden sich u. a. in [MÖSER et al. 2000], [DEUMLICH, STAIGER 2002] oder [STEMPFHUBER, WUNDERLICH 2004].

Die neueste Entwicklung auf dem Sektor der polaren Messsysteme ist der *terrestrische 3D-Laserscanner*. Diese Geräte ermöglichen, je nach Bauweise, einen bestimmten Ausschnitt oder sogar einen 360°-Bereich mit einer Geschwindigkeit von mehr als 500.000 Punkten pro Sekunden zu erfassen [ZF 2005]. Realisiert wird dies durch bewegliche Umlenkspiegel, deren jeweilige Messstellung in die polaren Winkelwerte umgerechnet wird. Als Resultat erhält man hierbei eine dreidimensionale Punktwolke, die das abgescannte Objekt repräsentiert und die bisherige Messung ausgesuchter Objektpunkte ersetzt. Eine unmittelbare Weiterverarbeitung zu einem 3D-CAD-Modell ist mit geeigneten Softwarepaketen möglich. Einen guten Überblick über die Technologie geben z. B. [WUNDERLICH 2002], [KRAUS 2004] oder [LUHMANN 2004].

☞ **Handgetragener Polarsensor**

Die auf dem Markt befindlichen und als handgetragener Polarsensor einsetzbaren Produkte können in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. *modulare Systeme*: Die Grundeinheit besteht hier aus einem Laserdistanzmesser mit integriertem Inklinometer. Der richtungsgebende Sensor ist als elektromagnetisches Kompassmodul oder als Horizontalwinkelgeber (Encoder) optional erhältlich und am Gerät montierbar.
2. *Integrierte Systeme*: Integration aller Messsensoren in einem System, z.B. als Fernglas.

Je nach Anzahl der integrierten Messsensoren können mit handgetragenen Polarsensoren ein, zwei- oder dreidimensionale Koordinaten bestimmt werden. Eine einheitliche Bezeichnung existiert für diese Systeme, wie bei anderen Messsensoren gewohnt, nicht. Im deutschen Sprachgebrauch werden sie als *polare Freihandmesssysteme*, *Messfernglas* oder *3D-Laserentfernungsmesser* bezeichnet. Im englischen Sprachraum ist die Bezeichnung *Laser Range Finder (LRF)* oder *Handheld Laser System* weit verbreitet. Die Abbildung 3-28 zeigt von links nach rechts als Produktbeispiele: *Impulse* einzeln, *MapStar Angle Encoder* auf Stativ und *Impulse* mit *Compass Modul* [alle LTI 2003] sowie das Messfernglas *Vector* [LEICA GEOSYSTEMS 2003]. Je nach Verwendungsart (freihändig oder Stativ) und Reichweite können mit handgetragenen Polarsensoren Punktgenauigkeiten von wenigen dm bis einigen m erreicht werden. Weitere Einzelheiten zu den Mess- und Fehlergrößen, den Beobachtungsverfahren und zu praktischen Beispielen werden im Kapitel 4 und 5 gegeben, da dieser Sensortyp eine Hauptkomponente von SmobGIS bildet.

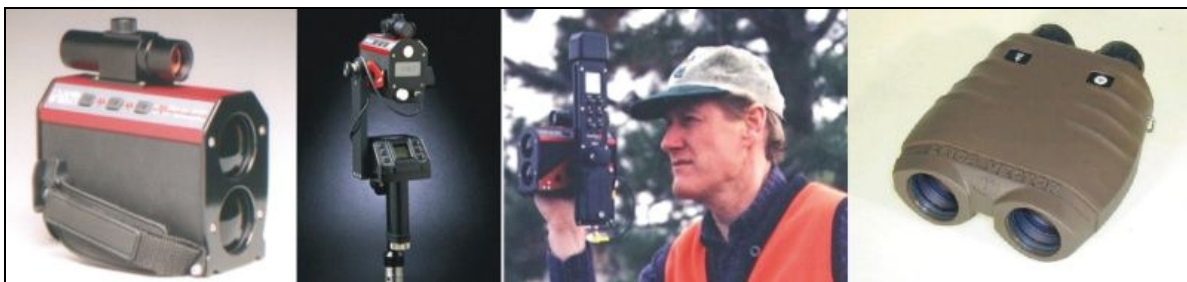


Abbildung 3-28: Produktbeispiele handgetragener Polarsensoren

3.4.4.2. Digitale Photogrammetrie

Mit Hilfe der digitalen, terrestrischen Photogrammetrie können aus Bildern die Lage und die Form von Objekten sowie einige ihrer Merkmale ohne direkte Berührung der Gegenstände rekonstruiert werden. Je nach verwendetem Sensor und Aufnahmeverfahren sind hierbei Genauigkeiten im sub-mm-Bereich möglich [KRAUS 2004]. Das Grundprinzip ist die Abbildung eines Objektes auf dem Messbild entsprechend den Gesetzen der Zentralprojektion und unter Beachtung der inneren und äußeren Orientierung. Letztere beschreibt die Lage des Projektionszentrums und die Richtung der Aufnahmeachsen im Objekt- oder Weltkoordinatensystem. Sie muss direkt, z. B. über Zusatzsensoren, oder indirekt über Passpunkte bestimmt werden, wobei hier auch die direkte Kombination mit Laserscannern [BENNING et al. 2004] oder Tachymetern, der sog. Phototachymetrie [SCHERER 2005], möglich ist. Praxisbeispiele für den Einsatz von photogrammetrischen Sensoren für mobile GIS finden sich bei den Mobile Mapping Systemen (Kap. 2.3.2), wobei hier noch Forschungsbedarf bei den personengestützten System besteht [z. B. NEXUS 2005].

3.4.4.3. Lokale Netzwerke

An dieser Stelle werden bewusst auch die lokalen und netzwerkgestützten Techniken aufgeführt, da sie im Hinblick auf Applikationen im Bereich der ortsbezogenen Dienste eine immer größere Rolle spielen. Anwendungsbeispiele sind die In- und Outdoor Fußgängernavigation, Besucher- oder Kundeninformationssysteme. Einen Überblick über diese Positionierungstechnik gibt [SCHÄFER 2003] oder [WUNDERLICH 2006]. Demnach können die vorhandenen Systeme anhand folgender Kriterien differenziert werden:

☞ *Positionierungssysteme basierend auf Infrarotwellen*

Hierbei kann nach den beiden Verfahren *Active Badges* (Aktive Namensschilder) und *Wireless Indoor Positioning System (WIPS)* unterschieden werden. *Active Badges* senden in kurzen Zeitabständen ein mit einer Benutzerkennung codiertes Infrarotsignal aus, das von Infrarotsensoren empfangen und an einen *Location Server* weitergeleitet wird. Aus dem Wissen über den Empfangsbereich jedes einzelnen Sensors lassen sich Rückschlüsse auf die Position des Namensschildes ziehen. *WIPS* stellt die Umkehrung des Verfahrens dar. Hier sind die Infrarotsender fest installiert und nicht vernetzt. Das mobile Badge empfängt die benutzerkodierte Signale von Infrarot-Baken und sendet die Signale via WLAN an den *Location Server* weiter. Dieser bereitet die Daten auf und sendet die entsprechende Ortsinformation wieder via WLAN zurück an das Namensschild. Da eine Sichtverbindung zwischen Bake und Sensor erforderlich ist, stellen Abschattungen ein großes Problem dar. Außerdem lassen sich Objekte nur einer bestimmten Zelle (= Sichtbereich) zuordnen, wobei die Zellaufteilung i. d. R. der Raumaufteilung entspricht.

☞ *Positionierungssysteme basierend auf elektromagnetischen Wellen*

Hierzu sind die *RFID-Systeme (Radio Frequency Identification)* zu zählen, die eine kontaktlose Identifikation mittels Funkübertragung ermöglichen. Sie bestehen aus einem aktiven oder passiven Transponder (Transmitter + Responder) und einer Schreib-/Lesestation. Der Vorteil dieser Systeme gegenüber den IR-Systemen ist, dass das Signal durch Wände dringt. Abschattungen und direkte Sichtverbindung spielen somit eine untergeordnete Rolle. Ebenso wie bei IR-Systemen ist das Ergebnis der Messung zu einem Transponder keine Objektkoordinate, sondern lediglich die Angabe, ob ein bestimmter Wegpunkt passiert wurde. Die Lagekoordinaten eines Objektes erhält man mit Hilfe einer technischen Weiterentwicklung der RFID-Systeme, den sog. *Real-Time Location Systems (RTLS)*. Neben der Identifikation über Funk erfolgt bei *RTLS* auch eine Entfernungsmessung zwischen Sendern (mit bekannten Koordinaten) und der Empfangsantenne, so dass ein räumlicher Bogenschnitt berechnet werden kann. Andere Verfahren mit elektromagnetischen Wellen nutzen zur Positionsbestimmung das Hyperbelverfahren mit den aus den Signalen bestimmten Phasen- und Zeitdifferenzen, den Einfallswinkel des Signals oder das o. g. Verfahren der Mustererkennung (*LPM*). Die Systeme liefern Genauigkeiten von wenigen cm bis einigen Metern.

☞ *Positionierungssysteme basierend auf Ultraschallwellen*

Diese Systeme ermitteln die Position in der Regel mit einem räumlichen Bogenschlag, dessen Streckenmessung auf einem Laufzeitverfahren mit Ultraschallwellen beruht. Aufgrund der geringen Schallgeschwindigkeit besitzt dieses Messverfahren den Vorteil eines geringeren Messaufwandes in Bezug auf die Zeitmessung. Der Nachteil, liegt in der großen Störanfälligkeit gegenüber Temperatureinflüssen (1800 ppm/°C) und anderen Schallquellen im Ultraschallbereich (z. B. Bohrmaschinen). Dennoch bieten Ultraschallsysteme bislang die höchste Positionsgenauigkeit (wenige mm bis 1-2 dm), ermöglichen jedoch nicht die Identifikation einer Person oder eines Objektes.

3.4.4.4. Pseudolites

Bei *Pseudolites* („Pseudo-Satelliten“) handelt es sich um am Boden installierte Signalsender, die zusätzliche Navigationssatelliten simulieren [COBB, O'CONNOR 1998]. Aufgrund der neuen geometrischen Konstellation, die sich durch die Verwendung von *Pseudolites* ergibt, sowie die positive Eigenschaft, dass ihre Signale nicht durch die atmosphärische Laufzeitverzögerung beeinflusst sind, kann so gemeinsam mit dem eigentlichen Satellitensystem GPS in einem lokal eng begrenzten Bereich von wenigen Kilometern eine genaue und sichere Navigation ermöglicht werden. Daher werden diese Systeme vor allem in der Luftfahrt (in der Nähe von Flughäfen) eingesetzt. Es gibt aber auch zahlreiche Untersuchungen, bei denen *Pseudolites* in Stadtgebieten oder innerhalb von Gebäuden verwendet wurden, um die GPS-Navigation in diesen Bereichen zu verbessern [ESA 2003]. Im Gegensatz zu den originalen GPS-Signalen treten hier allerdings wesentlich größere Mehrwegeeffekte und das *near/far*-Problem auf, bei dem das Signal der weiter entfernten *Pseudolites* von den Signalen der näheren *Pseudolites* überlagert wird [DAI et al. 2001].

3.5. Zusammenfassung und Bewertung

Mobilität und ortsbezogene Information gewinnen als Faktoren für effizientere Arbeitsabläufe oder als neue Dienstleistungsprodukte in Form der ortsbezogenen Dienste immer mehr an Bedeutung. Die allgemeine Dynamik in der Kommunikations- und Informationstechnologie sowie die gestiegenen Anforderungen an Geodaten hinsichtlich Qualität und Quantität haben auch positive Auswirkungen auf die Entwicklung mobiler raumbezogener Erfassungs- und Informationssysteme, die in verschiedenen Varianten und zahlreichen Begriffsdefinitionen existieren. Je nach Anforderungen der Zielapplikation werden hierzu verschiedene Positionssensoren, Messverfahren und Visualisierungstools miteinander kombiniert. Man unterscheidet dabei zwischen luft- und landgestützten Systemen, wobei letztere in der Regel als PKW- oder personenbezogenes System realisiert sind. Scheiterte in den vergangenen Jahren oft eine Realisierung effizienter (personenbezogener) Systeme an nicht geeigneten Hard- oder Softwarekomponenten, so stehen inzwischen einige felddaugliche mobile Recheneinheiten sowie geeignete Kommunikationsmittel, Softwarepakete und zahlreiche Positionssensoren zur Verfügung. Vor allem der Kenntnis über eine ausreichend genaue und zuverlässige Position fällt in diesem Zusammenhang eine tragende Rolle zu, denn letztendlich ist sie die Grundvoraussetzung für die Nutzung der Vorteile einer „vor Ort Verarbeitung“ raumbezogener Informationen. Damit ist auch der Grundgedanke eines *sensorgestützten mobilen GIS (SmobGIS)* gefunden, das über die vier Hauptkomponenten

- Sensorsystem
- Mobile Recheneinheit mit Display und felddauglichem Bedienungskonzept
- Informationssystem + mobile GIS-Applikation
- Kommunikation

definiert werden kann. Im folgenden Kapitel 4 wird an dem Beispiel eines SmobGIS für den Einsatz im Nationalpark Bayerischer Wald gezeigt, wie diese bisher konzeptionell aufgearbeitete Thematik anwendungsnah realisiert werden kann.

4. HTO-Teilprojekt 33-2: Sensorgestütztes mobiles GIS

4.1. Nationalpark „Bayerischer Wald“

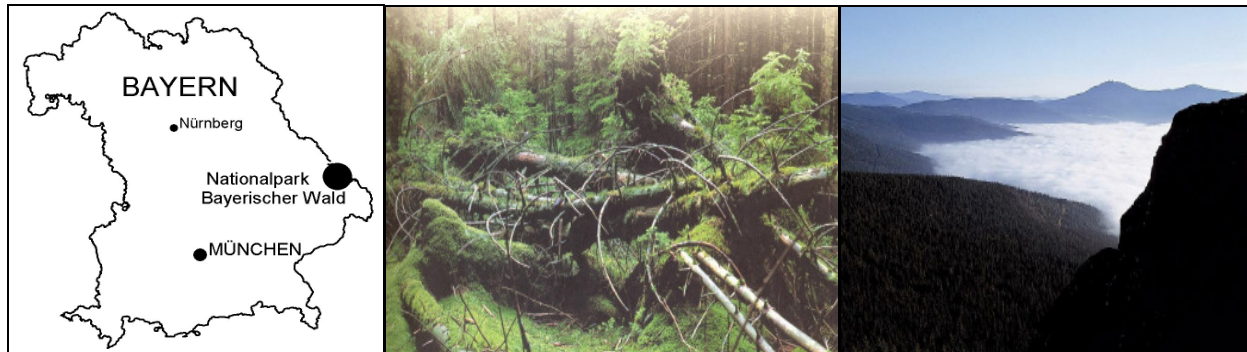


Abbildung 4-1: Nationalpark „Bayerischer Wald“

An der Grenze zwischen Bayern und der Republik Tschechien befindet sich das größte zusammenhängende Naturwaldgebiet in Zentraleuropa (Abb. 4-1). Mehr als 24.000 Hektar dieser Fläche wurden seit 1970 auf deutscher Seite als Nationalpark „Bayerischer Wald“ und knapp 70.000 Hektar als Nationalpark „Šumava“ auf tschechischer Seite unter Naturschutz gestellt. In dieser typischen Mittelgebirgslandschaft mit einer Höhenlage von 600 – 1500 m sind rund 98 % der Fläche mit Wald bedeckt. Das Motto des Nationalparks „Bayerischer Wald“ lautet hierbei „Die Natur sich selbst überlassen“. Deshalb ist eine forstliche Bewirtschaftung in vielen Teilen des Parks verboten bzw. wird nur noch in stark reduziertem Umfang durchgeführt. Der dadurch entstandene Naturwald bietet nicht nur Wissenschaftlern aus ganz Europa die einmalige Chance, die waldökologischen Zusammenhänge eines nahezu ungestörten Ökosystems zu erforschen, sondern dient vielen Menschen auch zur Erholung oder Bildung. Der Nationalpark ist im Besitz des Freistaates Bayern und wird von der Nationalparkverwaltung (NPV) mit Sitz in Grafenau geleitet, die seit dem 1. Nov. 2003 eine Sonderbehörde des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz darstellt. Davor gehörte sie zum Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (BayStMLF). Nicht nur bei der Durchführung alltäglicher Verwaltungsaufgaben, sondern vor allem bei den Forschungsarbeiten im Naturwald ist die NPV auf eine geordnete und umfangreiche Sammlung von digitalen Daten mit Orts- und Zeitbezug sowie effizienten Auswerte- und Analyse-tools angewiesen. In diesem Fall steht das Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ als zentrales Geoinformationssystem zur Verfügung, das seit 1996 vom Fachgebiet Geoinformationssysteme der TU München (Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Schilcher) aufgebaut wurde und näher im Kapitel 4.4.1 beschrieben ist.



Abbildung 4-2: Totholzflächen

Ein seit langem aktuelles und viel diskutiertes Thema ist die Entstehung riesiger Totholzflächen in den Fichtenaltbeständen der Hochlagen der beiden Nationalparke aufgrund extremen Borkenkäferbefalls in den letzten Jahren. Da mit steigender Meereshöhe die Windgeschwindigkeiten zunehmen, denen die absterbenden oder bereits abgestorbenen Bäume nicht standhalten können, hat sich auch die Gefahr von Windwürfen extrem verschärft. Aus älteren Totholzflächen sind bereits große Windwurfflächen entstanden, die nur schwer (und unter Lebensgefahr) oder gar nicht zu durchqueren sind (Abb. 4-2).

Daher zählt die Waldentwicklung im Nationalparkgebiet zu den aktuellsten Problematiken, mit denen sich die Nationalparkverwaltung beschäftigt. Hier sind neben einem umfangreichen Absterbeprozess auch die Entstehung einer neuen, natürlichen Waldgeneration sowie Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und den Stoffkreislauf zu beobachten. Diese gilt es in einem GIS zu dokumentieren, auf dieser Basis die Sachlage zu beurteilen und gleichzeitig umfassend zu informieren [NÜBLEIN, et al. 1999].

4.2. Motivation und Projektziele

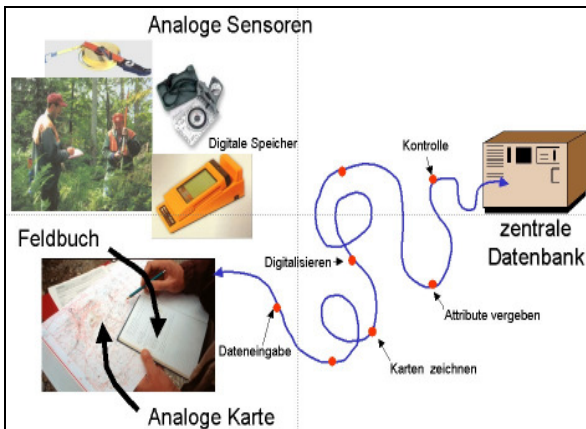


Abbildung 4-3: Digitaler Datenkreislauf NPV

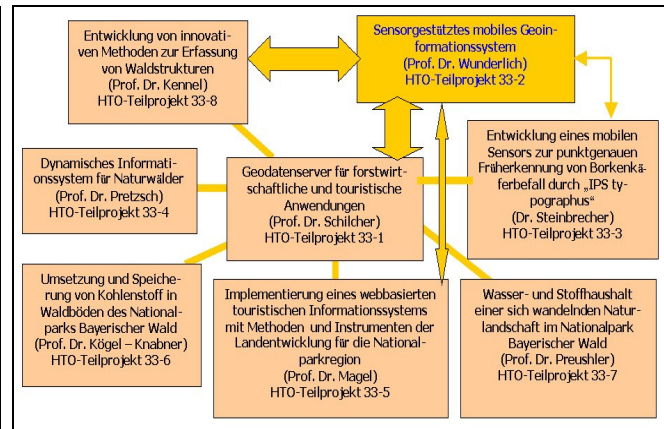


Abbildung 4-4: HTO-Verbundprojekt 33

Eine mit der NPV im Jahr 1999 durchgeführte und in [CZAJA 1999] dokumentierte Analyse des bestehenden digitalen Datenkreislaufes ergab, dass die Erfassung und Fortführung von forstwirtschaftlichen und waldökologischen Daten vor Ort für die vorhandene, moderne GIS-Plattform oft noch in analoger Form (z. B. Kompass, Karte, Feldbuch) oder auch in mehreren getrennten Arbeitsschritten erfolgt (Abb. 4-3). Außerdem zeigte sich bei vielen Anwendungsfällen ein steigender Bedarf an einer höheren Koordinatengenauigkeit und der Wunsch nach einer grafik- und sensorgestützten Navigation/Orientierung, die in den vielen unübersichtlichen und schwer begeharen Bereichen des Naturwaldes von großem Vorteil wäre. Deshalb initiierte der Lehrstuhl für Geodäsie der TU München unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung respektive der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald im Jahre 2000 das Forschungsprojekt **„Sensorgestütztes mobiles GIS“ (SmobGIS)**, das durch das Regionalkonzept der Regierung von Niederbayern im Rahmen der High-Tech-Offensive Bayern (HTO), einem Investitionsprogramm der Bayerischen Staatsregierung für die Förderung von Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, gefördert wurde. Wie aus der Abbildung 4-4 ersichtlich, ist es eines von acht Teilprojekten des HTO-Verbundprojektes 33 „Forschung über Waldökosysteme“, die zum Teil inhaltlich eng miteinander verknüpft sind. Die Stärke der Verbindungspfeile geben die Bedeutung der für das Projekt 33-2 relevanten Kontakte zu den anderen Teilprojekten wieder.

Ziel des Forschungsprojektes 33-2 „Sensorgestütztes mobiles GIS“ war die Entwicklung und Konzeption eines vielseitig einsetzbaren, feldtauglichen, mobilen Erfassungs- und Auskunftssystems, das selbst unter den schwierigen Messbedingungen einer Naturwaldlandschaft im Mittelgebirge eine Positionierung in Echtzeit mit Metergenauigkeit sowie die Erfassung und Visualisierung von grafischen und thematischen Informationen erlaubt. Dies sollte durch die Integration modernster Sensoren, Rechner, Kommunikationsmittel und Softwarekomponenten zu einem mobilen Gesamtsystem erreicht werden, wobei neben einer einfachen Bedienung und einem ergonomischen Tragekomfort auch ein verlässlicher Betrieb hinsichtlich der Energieversorgung und ein verlustfreier Datenaustausch zu gewährleisten waren. Daraus ergaben sich für die einzelnen Komponenten von *SmobGIS* folgende Ziele [WUNDERLICH, CZAJA 2000]:

Sensorik

Für die Positionierung und die vektorielle Objekteinmessung waren u. a. geodätische Sensorkomponenten wie differentielle GPS-Empfänger und polare 3D-Laserdistanzmesser vorzusehen und geeignet zu kombinieren. Aber auch der Datenaustausch mit speziellen Sensoren wie die *Künstliche Nase* (HTO-Teilprojekt 33-4) musste über geeignete Schnittstellen im mobilen GIS möglich sein. Die anfallenden geometrischen Daten wie beispielsweise die GPS-Positionen sollten geeignet verbessert (z.B. mit Hilfe von DGPS in Verbindung mit dem Satelliten-Positionierungsdienst SAPOS der Bayerischen Vermessungsverwaltung), verarbeitet und auf einem feldtauglichen Rechner visualisiert werden. Ein weiteres wichtiges Ziel bestand darin, die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten von modernen, geodätischen Sensoren und Messverfahren unter forstlichen Bedingungen auch auf andere waldökologischen Forschungsbereiche wie beispielsweise der *Tierpositionierung* oder auf bestehende Standardverfahren der Waldinventur der Bayerischen Staatsforstverwaltung zu übertragen.

Mobile Rechnerheit, Applikationssoftware, zentrales GIS

Die Sachdatenzuweisung hat auf einem berührungssensitiven Bildschirm per Stift über benutzerfreundliche Eingabemasken zu erfolgen. Im mobilen Rechner wird hierfür ein Ausschnitt des stationären Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ oder des *Geodaten servers für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen* (HTO-Teilprojekt 33-1) zur Ergänzung vor Ort vorgehalten, wobei für Orientierungszwecke auch ein Luft- oder Satellitenbild hinterlegt werden kann. Alle erfassten Objekte aus Fauna und Flora sollten so direkt im digitalen Plan angezeigt, überprüft, verglichen und ihre Eigenschaften wie beispielsweise Baumart oder Baumhöhe bearbeitet werden können (z. B. Objektdaten aus dem HTO-Teilprojekt 33-8 „Entwicklung von innovativen Methoden zur Erkennung von Waldstrukturen“). Anschließend erfolgt eine Aktualisierung des Datenbestandes im stationären GIS.

Kommunikation

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes war es, die Nutzung der neuesten Möglichkeiten der Mobilkommunikation (GPRS/UMTS) zu untersuchen, wodurch der jeweils örtlich relevante Datenbankinhalt des zentralen GIS mit den gesamten fachübergreifenden Informationen und vorliegenden Umweltdaten auch aus dem Feld abgerufen und vor Ort genutzt werden könnte. Dabei würden sich grundsätzlich durch die verwendete Technologien in Zukunft auch Einsatzmöglichkeiten im *Tourismus* ergeben, beispielsweise als Teil eines modernen Touristeninformationssystems (HTO-Teilprojekt 33-5).

Die Abbildung 4-5 gibt noch mal einen Überblick über das gesamte Grundkonzept des Projektes, das eine Laufzeit von knapp drei Jahren hatte (1. Dezember 2000 – 31. Oktober 2003) und ausführlich in [CZAJA 2003a] dokumentiert ist. In den folgenden Kapiteln werden daher nur die für diese Arbeit wesentlichen Punkte im Detail ausgeführt.

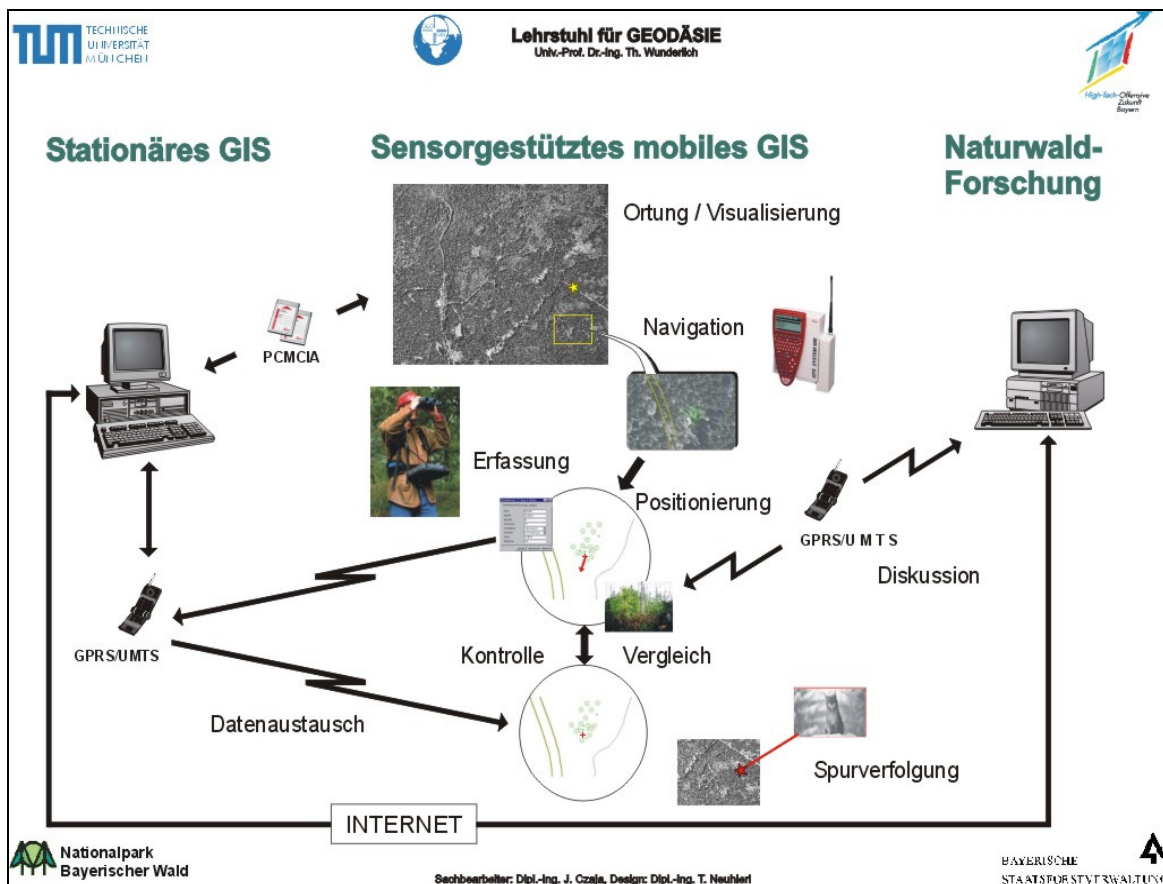


Abbildung 4-5: Grundkonzept des HTO-Projektes 33-2

4.3. Untersuchungsmethodik

Ausgangspunkt für die Untersuchungen innerhalb des Forschungsprojektes war die Definition von vier Anwendungsbeispielen für den möglichen Einsatz eines sensorgestützten mobilen GIS innerhalb der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. Auf dieser Basis wurden anschließend eine anwendungsorientierte Workflowanalyse, eine umfangreiche und stets aktuelle Marktrecherche sowie die prototypische Realisierung von SmobGIS durchgeführt. Die Umsetzung beinhaltete regelmäßige Praxistests in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Nationalparkverwaltung. Die daraus gewonnen Erkenntnisse flossen unmittelbar in eine verbesserte Version des Prototypen ein. Die Definition der Anwendungsbeispiele erfolgte in Abstimmung mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung und der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald. Dabei waren die folgenden Vorgaben zu beachten [CZAJA 2001b]:

- In den HTO-Teilprojekten wird die Entwicklung und Erforschung zukunftsorientierter Verfahren angestrebt (Prototypen). Ein unmittelbarer Einsatz der Verfahren in der Staatsforstverwaltung nach Projektende ist nicht vorrangiges Ziel der High-Tech-Offensive. Gleichwohl sollen Wege und Möglichkeiten für eine mittelfristige, praxisgerechte Nutzung aufgezeigt werden.
- Der **Schwerpunkt des Teilprojekts** ‚Sensorgestütztes mobiles GIS‘ liegt im Bereich der **mobilen Messtechnik und Messverfahren** für forstliche AAnwendungen sowie in der Realisierung des bidirektionalen Datenaustausches zum Referenz-GIS bzw. Geodatenserver. Vor allem sind die Möglichkeiten für eine **zuverlässige und ausreichend genaue Positionierung sowie grafischgestützte Orientierung und Objekterfassung** näher zu untersuchen.
- Der Begriff „Forstliche Inventurverfahren“ ist hier allgemein zu verstehen. Es wird ein Methodenmix außerhalb des Standardinventurverfahrens der Bayerischen Staatsforstverwaltung angestrebt, der näher im Kapitel 4.5.3 erläutert wird. Die Datenerfassung durch den Prototypen soll am Beispiel der Dauerbeobachtungsflächen der Nationalparkverwaltung, inventurbezogener und spezieller topographischer Objekte sowie gegebenenfalls Sonderanwendungen erfolgen. Als Testdaten sind die Inventuraldaten des Referenz-GIS zu verwenden.

In der folgenden Tabelle 4-2 sind die ausgewählten Anwendungen zusammenfassend dargestellt und kurz beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung der Applikationen findet sich im Kapitel 4.5.

Anwendung	Kurzbeschreibung
<i>Dauerbeobachtungsflächen (DbFl)</i>	Vegetationskundliche Beobachtung von ausgewählten, kleinräumigen Waldflächen (vor allem Windwurfflächen). Online Darstellung der Objekte in sog. Stammfußkarte mit Sachdateneingabe. Datenbank = MS Access Datenerfassung: Tachymeter Leica TCR307 + manuelle Sachdaten-Eingabe
<i>Topographische Objekte</i>	Erfassung von unterschiedlichen topographischen Objekttypen (Wege, Gebäude, Schilder,...) für alltägliche Verwaltungsaufgaben der NPV. Hauptsensor: GPS; Ziel: Flexible Einsatzmöglichkeiten aufzeigen !
<i>Inventurbezogene Objekte</i>	Auffinden und Einmessen von Inventurpunkten und -objekten, mit dem Ziel. Verbesserungsmöglichkeiten für die bisherigen Inventurverfahren aufzeigen (Standardverfahren des BayStMLF /NPV-Sonderverfahren). Zusätzliche Anforderungen aus HTO-Projekt 33-8: Einmessung und Darstellung von ausgewählten Pass- / Inventurpunkten und lokalen Referenzflächen
<i>Künstliche Nase</i>	Mobile Plattform mit chemischen und meteorologischen Sensoren zur Früherkennung von Borkenkäferbefall

Tabelle 4-1: Kurzbeschreibung der ausgewählten Applikationen für SmobGIS

4.4. Zentrales GIS der Nationalparkverwaltung

Der bidirektionale und verlustfreie Datenaustausch zwischen mobilem und stationärem GIS stellte eine der zentralen Fragestellungen bei der Realisierung des digitalen Datenkreislaufes innerhalb des Forschungsprojektes dar. Hierbei muss zwischen zwei stationären Systemen unterschieden werden:

- ☞ **Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“**
- ☞ **Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen**

Das Referenz-GIS stellt das zur Projektlaufzeit im Nationalpark verwendete Geoinformationssystem dar. Es wurde im Rahmen des HTO-Teilprojektes 33-1 zu einem Geodatenserver weiter entwickelt, der erst nach Ende des SmobGIS-Projektes einsatzbereit war. Um sowohl aktuelle als auch tragfähige, zukünftige Lösungen mit SmobGIS realisieren zu können, mussten bei der Umsetzung der Projektziele beide Systemarchitekturen berücksichtigt werden. Die folgenden Kapitel geben einen kurzen Überblick über diese beiden zentralen Geoinformationssysteme.

4.4.1. Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“

Der Systemaufbau, das Datenmodell und der Methodenumfang des im Rahmen einer Promotion entwickelten Referenz-GIS sind ausführlich in [HUBER 2002] und der zugehörigen „Wissenschaftlich-technische Dokumentation zum Referenz-GIS“ beschrieben, so dass hier nur die zentralen Punkte auszugswise wiedergegeben werden.

Demnach bilden die drei Komponenten *Meta-Datenkonzept*, *GIS-Daten* und *Systemplattform* das Kernsystem des Referenz-GIS. Ziel dieser gewählten zentralistischen Architektur ist es, sowohl ein performantes als auch anpassungsfähiges System zu ermöglichen, dass neben dem erforderlichen Funktions- und Methodenumfang auch die heterogenen Datenbestände und –modelle in Form eines relativ einfach zu bedienenden Systems für Dritte verfügbar und nutzbar macht. Einen Überblick über alle Systemkomponenten, Datenquellen und Produkte gibt die folgende Abbildung 4-6.

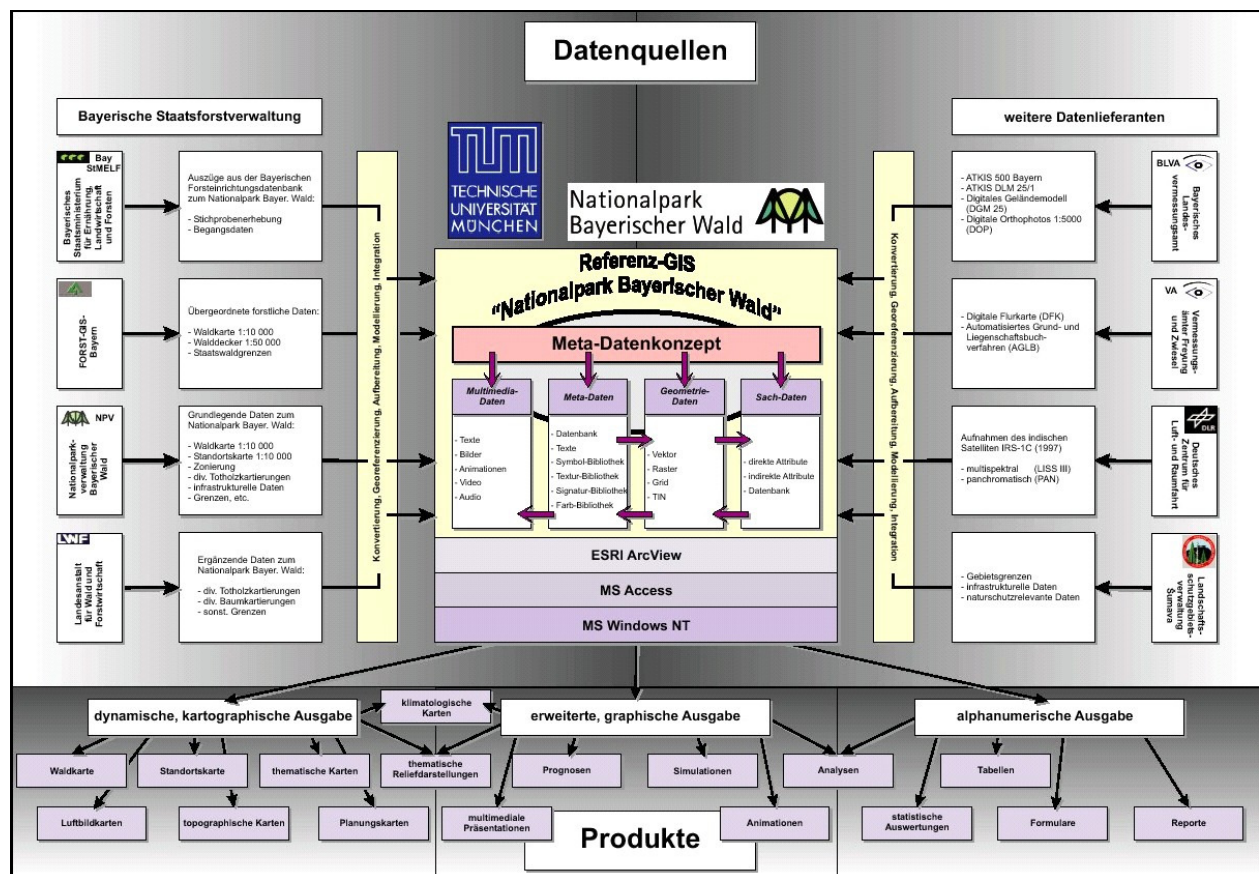
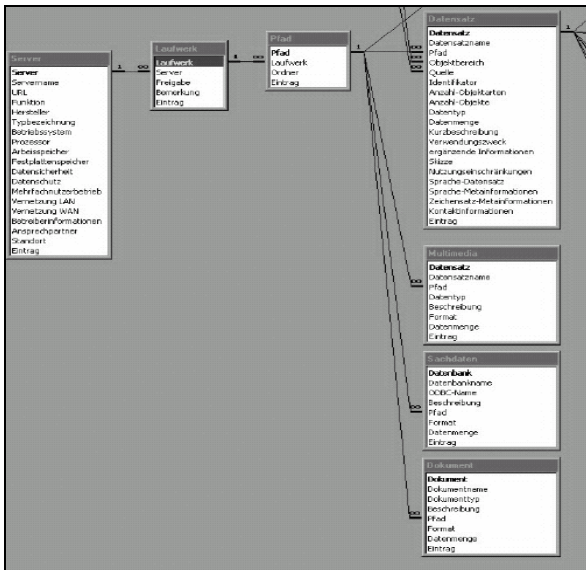


Abbildung 4-6: Systemkonzept Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ [HUBER 2002]

Meta-Datenkonzept



Das Meta-Datenkonzept liefert neben expliziten modelltechnischen Informationen den allgemeinen Nachweis, wo welche Daten über reale Objekte zum Nationalpark Bayerischer Wald oder Abstraktionen davon unter welchen qualitativen und quantitativen Bedingungen zu finden und/oder zu bearbeiten sind. Neben konkreten Verweisen zu allen im Referenz-GIS vorkommenden GIS-Datensätzen beinhaltet es zahlreiche detailbeschreibende Elemente. Diese Inhalte sind teilweise anwendungsabhängig erarbeitet und teilweise einem Core Metadata Profile entnommen. Das Core Metadata Profile enthält die wichtigsten, nach aktueller Meta-Datenstandardisierung und -Normung relevanten Meta-Informationen. Die Realisierung des Meta-Datenkonzeptes erfolgte datenbankorientiert und ist als Beispiel auszugsweise in der nebenstehenden Abbildung 4-7 wiedergegeben.

Abbildung 4-7: Auszug Meta-Datenmodell Referenz-GIS [HUBER 2002]

GIS-Daten

Die Datenbasis des Referenz-GIS wird derzeit aus den vier voneinander weitestgehend unabhängigen „Daten-Säulen“ *Geometrie-Daten*, *Sach-Daten*, *Meta-Daten* und *Multimedia-Daten* gebildet. Dabei kommen die vier (klassischen GIS-) Datentypen Vektor, Raster, Grid und *TIN (Triangulated Irregular Network)* bei der Geometrie-Datenhaltung zum Einsatz. Für einen flexiblen Einsatz der Forschungsplattform ist eine einfache, logisch strukturierte und intuitiv zu erfassende Datenstruktur notwendig. Die Datenhaltung des Referenz-GIS erfolgt daher über die klassische Trennung von Geometrie- und Sach-Daten. Wie in der Abbildung 4-8 dargestellt, ist die Verwaltung der Geometrie-Daten auf Betriebssystemebene in einem inhaltlich und physisch strukturierten Filesystem angesiedelt, wogegen die Sach-Datenhaltung mit Hilfe eines relationale Datenbank-Managementsystems (RDBMS) realisiert ist. Da hinsichtlich der Datenformate die Verwendung von Quasi-Industriestandards deutliche Arbeitserleichterung mit sich bringt [HUBER 2002], greift das Referenz-GIS bei den Geometrie-Daten primär auf das *Shape*-Format der Firma ESRI (*Environmental Systems Research Institute, Inc.*) zurück, das bei den Vektor-Daten einer der derzeit wichtigsten Quasi-Industriestandards in GIS darstellt und in [ESRI 1998] ausführlich beschrieben wird. Analoges gilt für das *TIFF*-Format (*Tagged Image File Format*) [ADOBE 1992] bei der Nutzung von Raster-Daten. Alphanumerische Sachinformationen findet man entweder in Form von direkten, im Geometrie-Datenformat abgelegten Attributen oder indirekten, den Geometrie-Daten über 1:1-Verknüpfungen manuell zugeordneten Attribut-Tabellen, die wiederum in eigenen Dateien liegen und eigens verwaltet werden müssen. Der hier gewählte und realisierte klassische Modellansatz lässt sich somit wie folgt zusammenfassen (Abb. 4-9):

- ☞ Geometrie in Files mit direkten und indirekten Attributen
- ☞ komplexes Sach-Datenmodell in RDBMS
- ☞ Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen direkten Attributen und der α -Datenbank
- ☞ Zugriff auf die Geometrie- und Attributformationen über die GIS-Software
- ☞ Zugriff auf die Sachinformationen über das RDBMS oder das GIS-Frontend

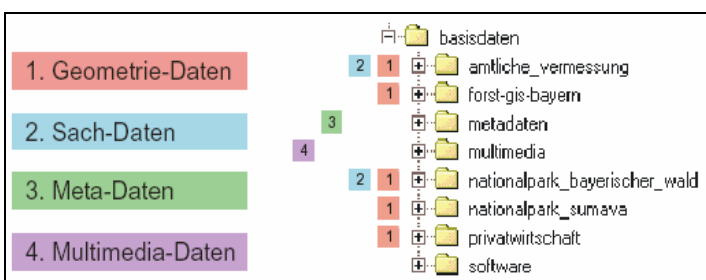


Abbildung 4-8: Inhaltliche und physische Struktur [HUBER 2002]

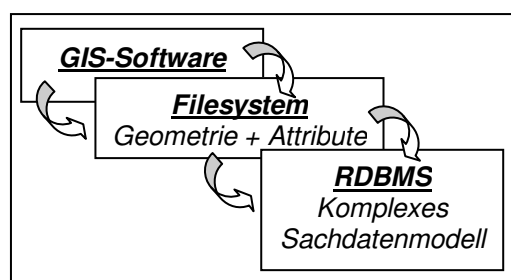


Abbildung 4-9: Filesystem und RDBMS

1. Amtliche Geo-Basisdaten der BayVV	2. Behördliche Daten der NPV sowie des BayStMLF	3. Datenbestände zum tschechischen Nationalpark Sumava	4. Privatwirtschaftliche Datenbestände
ATKIS DLM 25/1	Waldkarten 1:10 000	infrastrukturelle Datenbestände	multispektrale Fernerkundungsdaten
ATKIS 500 Bayern	Forstbetriebskarten 1:10 000	umweltrelevante Datenbestände	panchromatische Fernerkundungsdaten
DGM 25	Standortskarten 1: 10 000		Temperaturverteilungen
DOP 1:5 000	historische Schadfächkartierungen		Schadensklassifizierungen
DFK	Totholzkartierungen		
Flurkarte 1:5 000	Geologische Karten 1:25 000		
AGLB	Waldinventuren		
UK 500	IR-Luftbilder		
TK 100	Klimadaten		
TK 50	Waldecke		
TK 25	Tourismus-Daten sonstige Erhebungen		

Tabelle 4-2: Übersicht Datenbestände Referenz-GIS [HUBER 2002]

Die strukturierte Datensammlung des Referenz-GIS umfasst derzeit weit mehr als 700 amtliche, behördliche, privatwirtschaftliche und internationale Geo-Datensätze aus ca. 90 verschiedenen Datenquellen von neun beteiligten Institutionen in Verbindung mit drei relationalen Sach-Datenbanken und einer zentralen Meta-Datenbank vor. Die Tabelle 4-2 gibt einen groben Überblick über die wichtigsten verwendeten Datenquellen, die sich anhand von vier verschiedenen Datenquellentypen unterscheiden lassen.

Systemplattform

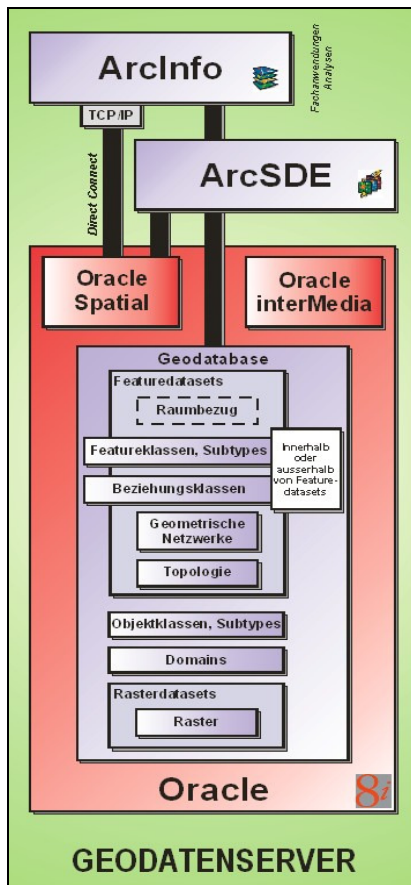
Die Hardwarearchitektur des Referenz-GIS besteht aus einem hochskalierten Geodatenserver mit dem Betriebssystem Windows NT 4.0 und mehreren Workstations als Arbeitsplatzrechner, die über eine leistungsstarke, hybrid-sternförmige Vernetzung intern miteinander verknüpft und über das Hochschulnetz extern an das Internet angebunden sind. Die GIS-Software setzt sich aus dem GIS-Frontend *ArcView 3.2a* der Firma ESRI mit den Erweiterungen *SpatialAnalyst* und *3DAnalyst* sowie einer selbst entwickelten Systemumgebung und Benutzeroberfläche zusammen. Zusätzlich werden noch extern entwickelte ArcView-Erweiterungen verwendet, so dass mit diesem Softwarepaket die hybride Kombination und Verarbeitung der o. g. Geometrie-Datentypen innerhalb einer einheitlichen Systemumgebung möglich ist. Die Modellierung und Realisierung aller Datenbanken erfolgt mit Microsoft Access 2000.

4.4.2. Geodatenserver für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen

Die Weiterentwicklung des Referenz-GIS zum Geodatenserver durch das Fachgebiet Geoinformationssysteme der TU München erfolgt wiederum in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung und der NPV Bayerischer Wald. Ziel ist der Aufbau einer auf modernster GIS-Technologie basierenden, webfähigen Forschungsplattform für Naturwaldökologie und Tourismus bis Ende 2004. Die Realisierung berücksichtigt die aktuellen nationalen und internationalen GIS-Standards und ist auf das Produktspektrum *ArcGIS 8.x* (ESRI) abgestimmt, da der Basisdatenbestand des Referenz-GIS bereits im ESRI-Datenformat vorliegt. Außerdem stehen, wie im Kap. 4.6.2 noch näher erläutert wird, neben dem High-End GIS *ArcInfo* auch die mobile GIS-Software *ArcPad* sowie der Internet Map Server *ArcIMS* zur Verbreitung von Geodaten über das Internet für die Anwendungen der anderen Teilprojekte zur Verfügung, so dass ein *konvertierungsfreier und damit performanter Datenaustausch realisierbar ist*.

Systemkonzept:

Ein wesentlicher Unterschied zum Referenz-GIS besteht in der Datenverwaltung. Während die Datenbestände bisher noch dual in einem Filesystem und einer Datenbank verwaltet werden, sieht das neue *integrierte Datenhaltungskonzept* die vollständige Archivierung von Geometrie- und Alphan Daten sowie aller relevanten Multimedia-Daten wie Bilder, Video- und Tonsequenzen der Projektregion in einer objektrelationalen Datenbank vor. Dies hilft, bestehende Konsistenzprobleme zu beheben, *erhöht die Leistungsfähigkeit und erlaubt die Verwaltung von komplexen, benutzerdefinierten Geodatentypen*, die bisher in ArcView nicht unterstützt wurden. Nach [SCHEUGENPFLUG 2003] trägt vor allem diese Erweiterbarkeit um raumbezogene, benutzerdefinierte Datentypen wesentlich zur Erhöhung des Analysepotenzials bei. Außerdem ermöglicht die neue Datenbanktechnologie *umfangreiche Transaktionen und verbesserte Sicherungskonzepte* sowie einen *projektbasierten Mehrbenutzerbetrieb*, der auch über das Internet erfolgen kann. Als einheitliches Raumbezugssystem wird das amtliche bayerische Koordinatensystem nach Gauss-Krüger verwendet. Wie in der Abbildung 4-10 auf der nächsten Seite dargestellt, bestand die Softwarearchitektur des Geodatenservers während der Projektlaufzeit aus der objektrelationalen Datenbank *Oracle 8i* der Firma Oracle sowie der GIS-Software *ArcInfo 8.3* und dem GIS-Datenbank-Gateway *ArcSDE 8.3* von ESRI. Als Hardwareplattform wird ein leistungsstarker Server auf Intel-Basis mit dem Betriebssystem Windows 2000 eingesetzt, auf den über das lokale Institutsnetzwerk mit diversen Workstations oder über das Hochschulnetz via Internet und geeigneter Client-Software zugegriffen werden kann.



Das Geodatenmodell in *ArcGIS* unterstützt die Abbildung raumbezogener Informationen als Vektoren, Raster und anderer Datentypen, die wahlweise in Dateien oder in einem RDBMS gespeichert werden können. Im Dateisystem beinhaltet dies die Unterstützung der im Referenz-GIS verwendeten Datenformate Shape, Grid, TIN und TIFF sowie weiterer, zahlreicher Imageformate. Wird dagegen ein RDBMS eingesetzt, erfolgt die Verwaltung der geographischen Informationen in einer Geodatenbank (ESRI-Geodatabase) und es stehen zahlreiche Funktionalitäten und Eigenschaften eines RDBMS zur Verfügung. Hierzu ist z. B. die Definition von Beziehungen (Relationships) zwischen raumbezogenen Objekten (Features) bzw. nicht räumlichen Objekten (Objects) zu zählen, so dass die verwendeten Objekte und ihre Eigenschaften sehr wirklichkeitsnah in einem Geodatenmodell abgebildet werden können. Zudem kann durch den optimierten Zugriff auf eine Geodatenbank innerhalb der *ArcGIS*-Software eine bessere Performance als bei einer filebasierten Geodatenhaltung erzielt werden. Der Zugriff auf die Datenbestände der Geodatabase erfolgt mit der „Spatial Database Engine“ (*ArcSDE*). Sie stellt das Bindeglied zwischen den *ArcGIS*-Applikationen der HTO-Teilprojekte und den Geodaten in der *Oracle*-Datenbank dar. *ArcSDE* besitzt die Fähigkeit, raumbezogene Daten in einem Datenbanksystem zu verwalten und mehreren Nutzern parallel zugänglich zu machen. Zudem vereinheitlicht *ArcSDE* als Schnittstelle die Zugriffe auf Datenbanksysteme von unterschiedlichen Herstellern und erlaubt die gemeinsame Nutzung des zentralen Datenpools über verschiedene *ArcSDE*-Clients wie z.B. *ArcInfo* oder *ArcView*.

Abbildung 4-10: Softwarearchitektur Geodatenserver [SCHEUGENPFLUG 2003]

Realisierung:

Die Datenbank *Oracle 8i* zählt zu den DBMS, die objektrelationale Funktionalitäten anbieten. Die interne Datenbankerweiterung *Oracle Spatial* schafft durch universellen Geometriedatentyp „SDO_Geometry“ die Grundlage zur objektrelationalen Verwaltung von Vektorgeometrien in einem DBMS. Da selektive Rasterdatenoperationen auf Datenbankebene erst in der Version *Oracle 10g* unterstützt werden, ist die Verwaltung räumlicher Daten vor allem für Vektordaten interessant. Diesbezüglich stellt das Datenbanksystem verschiedene vektorbasierte Funktionen und Operatoren zur Verfügung, z. B. für die Verschneidung oder Pufferbildung. Die vollständige Migration der in Kap. 4.4.1 beschriebenen Vektor- und Rasterdaten des Referenz-GIS in die *Oracle*-Datenbank wurde durchgeführt. Beide Datentypen liegen in strukturierter Form im SDE-Binary-Format in der Geodatabase vor. Dieses Format verspricht derzeit den schnellsten Zugriff und wurde gegenüber dem universellen Datentyp SDO-Geometry vorgezogen [SCHEUGENPFLUG 2003]. Das Ein- und Auslesen der Datensätze aus der Datenbank kann mit einem beliebigen *ArcSDE*-Clienten über die *ArcSDE* erfolgen, wobei über die angebotenen Konvertierungsfunktionen auch die bisher genutzten Fileformate verwendet werden können. Dem Aspekt einer benutzerfreundlichen Systemumgebung wurde ähnlich wie beim Referenz-GIS durch die Bereitstellung von knapp 20 vordefinierten Kartenviews Rechnung getragen, die aus mehreren thematisch zusammengehörigen Layern eine Karte bilden (z. B. Dynamische Waldkarte). Für die Übernahme von Alphan Daten in die *Oracle*-Datenbank wurde in [EICHINGER 2003] am Beispiel der Sachdaten des Referenz-GIS ein effizientes Migrationskonzept entwickelt und getestet. Hierbei konnte das bestehende Sachdatenmodell in Absprache mit der Bayerischen Staatsforstverwaltung hinsichtlich Konformität zur Forsteinrichtungsdatenbank (FE-DB) des BayStMLF (s. Kap. 4.5.3) optimiert, erweitert und migriert werden. Der Zugriff auf die Sachdatentabellen ist unter anderem über eine ODBC-Verbindung einer Access-Datenbank zum *Oracle*-Server möglich. Die bestehenden Metadaten des Referenz-GIS wurden ebenfalls migriert und bezüglich einer integrierten Datenhaltung angepasst. Dabei sieht das realisierte Konzept einen permanenten den Abgleich zwischen datensatzbegleitenden und zentralisierten Metainformationen in der Datenbank vor. Weitere Details zum Geodatenservers finden sich in der ausführlichen wissenschaftlich-technische Dokumentation in [SCHEUGENPFLUG 2004] und [SCHEUGENPFLUG 2005].

4.5. Anforderungsanalyse der Beispielapplikationen

Im Rahmen einer detaillierten Soll-Ist-Analyse galt es die bereits bestehenden als auch die für SmobGIS relevanten Arbeitsabläufe, Arbeitsmittel, Genauigkeitsanforderungen, Datenmodelle und Datenschnittstellen für die ausgewählten Anwendungsbeispiele zu untersuchen. Die daraus resultierenden Ergebnisse dienen als Grundlage für die spätere Realisierung der SmobGIS-Applikationen und sind in ihren wesentlichen Punkten in den folgenden Kapiteln beschrieben. Weitere Details finden sich in [CZAJA 2003a/b]

4.5.1. Dauerbeobachtungsflächen

Ist-Analyse:

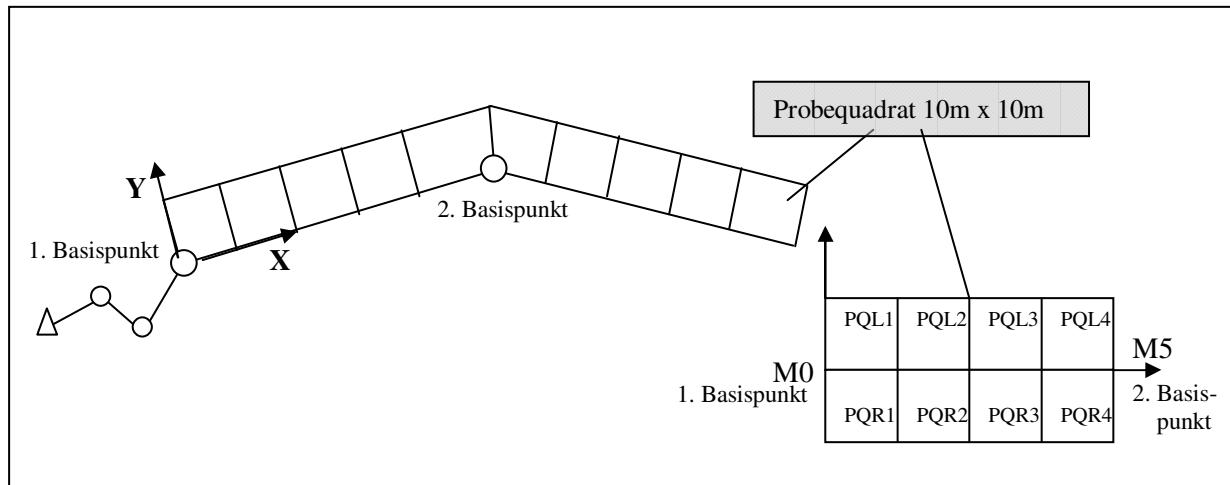


Abbildung 4-11: Anordnung von Probequadratflächen einer Dauerbeobachtungsfläche

Eine *Dauerbeobachtungsfläche (DbFl)*, auch *Transsekt* oder *Referenzfläche* genannt, stellt neben der Inventur ein wichtiges Hilfsmittel für das Langzeit-Monitoring im Nationalpark Bayerischer Wald dar, bei dem Waldentwicklung, Lebensgemeinschaften und Artenausstattung in repräsentativen Ausschnitten dokumentiert werden. Wie in der Abbildung 4-11 dargestellt, werden hierzu ausgewählte Waldflächen in mehrere kleinräumige Probequadrate (z. B. 10 x 10 m) eingeteilt, wobei die Anordnung der Probequadrate unterschiedlich sein (z. B. schlauchförmig oder flächenhaft). Bisher wurden lokale, rechtsorientierte Koordinatensysteme verwendet, die über zwei Basispunkte definiert sind und deren Ursprung i. d. R. im 1. Basispunkte liegt. Der Anschluss der Basispunkte an das Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger erfolgte über Polygonzüge mit relativ geringer Genauigkeit (Grenzsteine, Bussole, etc.). Die Detailaufnahme der Objekte in den Flächen wurde bis 1999 mit einem analogen Theodolit und Maßband durchgeführt. Da die Anzahl der aufzunehmenden Transsekte stetig wuchs, entschloss sich die NPV mit einem Tachymeter vom Typ TCR307 der Fa. Leica Geosystems einen digitalen Datenfluss aufzubauen.

Die Verwaltung der Objektdaten aller Dauerbeobachtungsflächen erfolgte bis Anfang 2003 in der MS Access 97 Datenbank „Windwürfe“. Eine ausführliche Dokumentation zu dieser Datenbank existierte nicht. Da sich im Jahre 2002 die Anzahl der eingerichteten Flächen und erfassten Objekte auf Grund des HTO-Projektes 33-8 drastisch erhöhte, entschloss sich die NPV die Datenbank im März 2003 neu zu konzipieren. Die bisherigen und neu erfassten Objektdaten werden seit dem in der MS Access 2000-Datenbank „*Vegetationskundliche Dauerbeobachtungen*“ verwaltet. Grafisch wurden bisher alle Transsekte manuell (und damit sehr aufwendig) in Corel Draw visualisiert. Die Abbildung 4-12 zeigt hierzu ein Beispiel, in dem ein Transsekt sowohl im Grund- als auch im Aufriss dargestellt wird. Durch dieses Vorgehen existieren keine digitalen Geoobjekte, die in ein (mobiles) GIS übernommen werden könnten.

Die Objektaufnahme beinhaltet zwei unterschiedliche Arbeitsschritte. Begonnen wird mit einer Voranalyse, bei der die bereits erfassten Objekte anhand eines analogen Kartenausschnitts und einer Objektliste kontrolliert sowie neue Objekte vermerkt werden. Anschließend erfolgt die Einmessung ausschließlich der neuen oder veränderten Objekte mit dem Tachymeter mittels polarer Aufnahme nachdem eine Standpunktkoordinierung durch eine „Feie Stationierung“ über sichtbare Probequadratecken durchgeführt wurde (Genauigkeit 10 cm). Die Geometriedaten werden im Tachymeter gespeichert und als ASCII-

Punktliste ausgelesen (Nr, x,y,z, Code). Alle Sachdaten werden in Formularen erfasst und anschließend im PC manuell eingegeben. Die für die Bestimmung diverser forstlicher Parameter verwendeten Geräte erfordern keinen Online-Anschluss. Auch ein online Datenaustausch zum zentralen Referenz-GIS in Form einer WebGIS-Applikation ist nicht erforderlich. Folgende Objekttypen werden aufgenommen:

- *Punktobjekte*: stehender Baum, Stöcke
- *Linienobjekte*: Wurzelteller, Rückegasse, Wege, geomorphologische Objekte (z.B. Bach)
- *Polygonobjekte*: liegendes Totholz, Kronenprojektionen, Quellsümpfe, Felsen (nach Bedarf)

Der Grund für die Aufteilung der Aufnahme in zwei Arbeitsschritte liegt in der schwierigen Begehrbarkeit und geringen Übersichtlichkeit von Windwurfflächen. Da die Vor-Analyse mit nur relativ wenig Ausrüstung durchführbar ist und keine Probleme der Objektaufnahme durch die i. d. R. sehr schwierigen Messbedingungen zu lösen sind, erhöht sich neben der Beweglichkeit, und damit der Sicherheit der Bearbeiter, auch die Konzentration auf die Objektinformationen innerhalb eines Probequadrates (Fehlervermeidung).

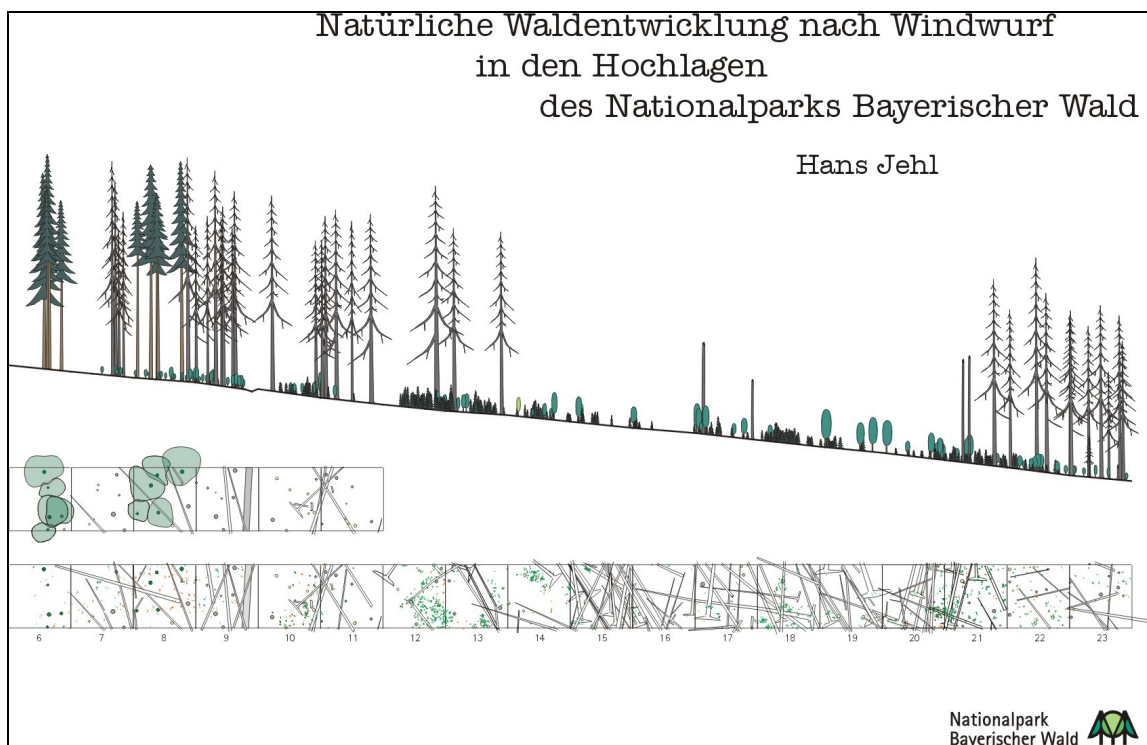


Abbildung 4-12: Manuell erstellter Bestandsaufriss eines belassenen Windwurfs [JEHL 1995]

Soll-Analyse:

Das Ziel der Applikation „Dauerbeobachtungsfläche“ ist die zweidimensionale, digitale Online-Darstellung und -Erfassung von vegetationskundlichen Objekten im Feld mit bidirektionalem Datenfluss zur Datenbank „Vegetationskundliche Dauerbeobachtungen“. Die Sachdatenabfrage bzw. -eingabe mit Plausibilitätsprüfung vor Ort hat digital und formularbasiert zu erfolgen, wobei die bisherige Aufteilung der Feldaufnahme in Vor-Analyse und Objekteinmessung beizubehalten ist. Die mobile Recheneinheit sollte daher sowohl für den personengestützten, mobilen Einsatz der Vor-Analyse (hohe Ergonomie, stiftbasierte Eingabe) als auch für die statische Verwendung am Stativ (Tastatur, großes Display) geeignet sein. Als Aufnahmesensor ist der Tachymeter TCR307 und als Raumbezug das bestehende lokale Koordinatensystem zu verwenden. Zusätzlich ist die Koordinierung der Probequadratscheiben im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (GK) gewünscht, um in Zukunft die Transekte über diese dauerhafte Vermarkung besser auffinden und geeignet mit Daten des Referenz-GIS verschneiden zu können (Übersichtskarten, Analysen). Existieren schon GK-Koordinaten für eine Referenzfläche, dann ist eine Visualisierung im GK-System wünschenswert. Die Geometrie- und Sachdaten sind im Shape-Datenformat (ESRI) vorzuhalten, um den bidirektionalen Datenfluss zum Referenz-GIS bzw. Geodatenserver zu gewährleisten. Als Visualisierungssoftware im Büro ist das in der Nationalparkverwaltung bereits vorhandene Desktop-GIS *ArcView 3.2a* zu verwenden.

4.5.2. Topographische Objekte

Ist-Analyse:

In Bezug auf topographische Objekte gibt es derzeit keinen Workflow innerhalb der Nationalparkverwaltung, da bis jetzt noch keine Erfassung oder Fortführung durch NPV-Mitarbeiter erfolgte. Es liegen somit auch keine Erfassungsregeln oder Darstellungsvorschriften in Form eines Objektklassenkataloges vor.

Soll-Analyse:

Im Rahmen dieser Applikation ist die Erfassung und Fortführung von ausgewählten topographischen Objekten des Nationalparks Bayerischer Wald mit Hilfe eines mobilen GIS zu realisieren. Für die Aufnahme der punkt- linien- oder flächenförmigen Objekte ist eine Positionsgenauigkeit von 1 - 5m ausreichend, wobei eine lagerichtige Darstellung im Kontext der Umgebung Vorrang haben sollte (z.B. Wegweiser muss auf der richtigen Seite des Weges stehen, aber nicht unbedingt auf 1m genau). Neben einer digitalen, formularbasierten Sachdatenabfrage bzw. -eingabe mit Plausibilitätsprüfung vor Ort ist auch die Verknüpfung mit digitalen Bildinformationen gewünscht. Die Datengrundlage für diese Applikation (Wegenetz, Topographie, Luftbilder) und das Shape-Datenformat werden durch das in der NPV eingesetzte Referenz-GIS vorgegeben. Dadurch ist auch das bayerische Landeskoordinatensystem Gauß-Krüger als Raumbezug für die topographischen Objekte festgelegt. Eine Zusammenstellung der für diese Applikation relevanten Objekte inklusive ihrer interessierenden Attribute ist in Abbildung 4-13 gegeben. Eine online Datenübertragung ins Feld in Form einer Web-GIS Lösung ist z. Zt. nicht für notwendigig.

Objekte	Typ	Strassenverkehrsrecht	Spezielle Verkehrsarten (Markierungen)	Kenntung	Verpflichtung zur Erhaltung nach NP-VO	Technischer Ausbau	Fahrbahnbreite in m (Genauigkeit 0,5m)
Weg	Linie	Bundesstraße Staatsstraße Kreisstraße Gemeindestraße Privatweg	Radweg Reitweg Wandweg Loipen Nicht markiert	Straßenname Nummern Markierungszeichen	Ja oder nein	Asphaltdecke Wasserabfuhr Becke unbefestigt	
Objekte	Typ	Kenntung	Anzahl der Parkplätze	Status Gespernt von bis			
Parkplatz	Punkte	Name	PKW Sommer PKW Winter BUS Sommer BUS Winter				
Objekte	Typ	Kenntung	Breite in 0,5 m Schritten				
Gewässer	Linie						
Objekte	Typ	Kenntung	Eigentümer/Betreiber	Messparameter			
Wetterstation	Punkt	Name Koordinaten	Deutscher Wetterdienst	Temperatur Niederschlag etc.			
Objekte	Typ	Kenntung	Nutzungsart				
Gebäude	Polygon/Fläche	Name Nummer	Hütte Unterstand Betriebsgebäude Infogebäude (Infozentrum, Infostelle, Informationspavillon)				
Objekte	Typ	Kenntung	Nutzungsart	Installationsjahr	Inhalt		
Infotafel	Punkt	Nummer	Wegweiser Infoschild Infotafel		Geol.Druck, Bildzeichen		

Abbildung 4-13: Beispiel Objektklassenkatalog „Topographischer Objekte“

4.5.3. Inventurbezogene Objekte

Eine *Waldinventur* beinhaltet nach [BRÜNIG, MAYER 1980] die Aufnahme und Darstellung von Informationen über Größe und Verteilung von Waldflächen, Zustand und Leistung des Holzvorrates sowie der aktuellen Bedarfslage. Eine *Stichprobeninventur*, bei der der Waldbestand stichpunktartig erfasst wird, stellt hierbei eine wichtige Methode zur Erfassung dieser forstwissenschaftlichen Daten dar und wird in der Regel für den jeweiligen Forstbetrieb im Rahmen der Forsteinrichtung alle 10 Jahre durchgeführt [BIERMAYER et al. 1999]. Da sich das Inventurverfahren im Nationalpark Bayerischer Wald auf Grund von Sonderanwendungen von dem Standardverfahren der Bayerischen Staatsforstverwaltung unterscheiden kann, wurde bei der im folgenden Kapitel beschriebenen Anforderungsanalyse der inventurbezogenen Objekte nach den folgenden drei für eine Inventur relevanten Applikationen unterschieden:

- ☞ Inventur Standardverfahren (NPV)
- ☞ Einmessung von Inventurpunkten mit GPS
- ☞ HTO-Projekt 33-8: Pass- und Inventurpunktbestimmung (Sonderanwendungen)

Ist-Analyse:

a) Inventur Standardverfahren (NPV):

Das Inventurverfahren der Nationalparkverwaltung baut auf dem Standardverfahren der Bayerischen Staatsforstverwaltung (BayStaFV) auf und weist Unterschiede vor allem hinsichtlich der aufzunehmenden, waldökologischen Parameter und weniger im Verfahrensablauf auf. Im Rahmen dieser Arbeit sollen nur die wesentlichen Merkmale und Methoden beschrieben werden, die für Realisierung von SmobGIS von Relevanz sind. Weitere Informationen zu den Inventurverfahren der Forsteinrichtung finden sich u. a. in [FER 1982], [EG20 1996], [GRÜNVOGEL, HEURICH 2002] und [LOTHER 2003].

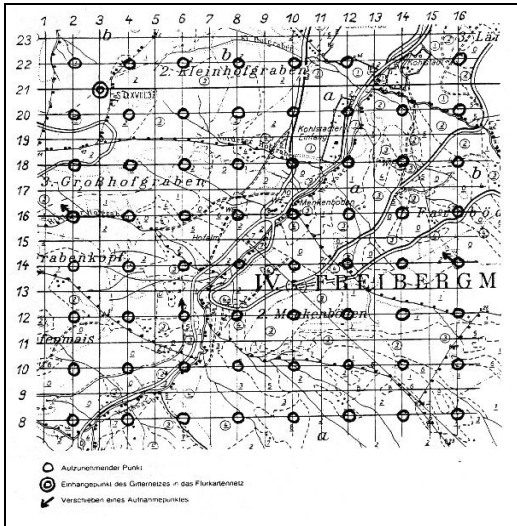


Abbildung 4-14: Inventurgitter

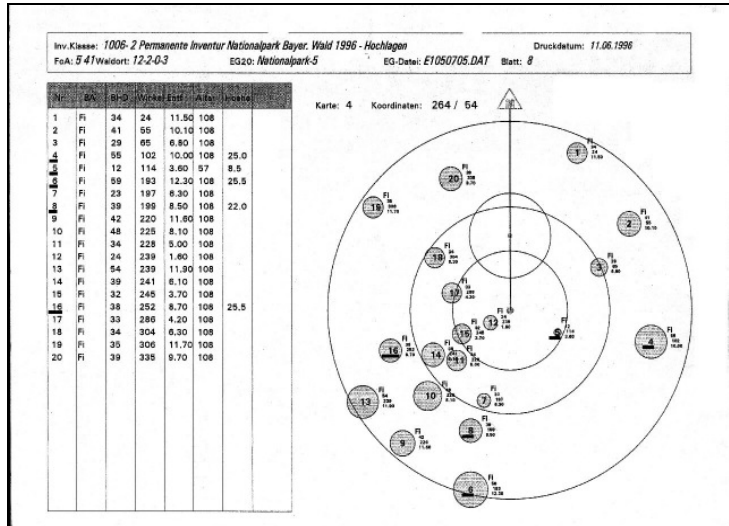


Abbildung 4-15: Baumplot Probekreisverfahren

Es werden im Wesentlichen zwei Inventurverfahren angewandt: Die **temporäre Stichprobeninventur**, bei der entweder die *Winkelzählprobe* oder das *Kreisverfahren mit konzentrischen Kreisen* (Abb. 4-15) benutzt wird, oder die **permanente Inventur**, bei der nur das Kreisverfahren herangezogen wird. Für die in diesem Projekt betrachtete permanente Inventur sind fest vermarktete *Inventurpunkte* in einem regelmäßigen Raster von 100 bzw. 200 Metern im Gelände verteilt. Von ihnen aus werden Probebäume anhand ihrer Polarkoordinaten abhängig von ihrem *Brusthöhendurchmesser (BHD)* in konzentrischen Kreisen unterschiedlicher Radien um den Inventurpunkt aufgenommen (sog. Koordinatenbäume). Die Probebäume, deren BHD unter der in der *Inventuranweisung* festgelegten Grenze liegt, erhalten keine Polarkoordinaten und werden nur dem Inventurpunkt zugeordnet (sog. Nicht-Koordinatenbaum). Die Eigenschaften der Probebäume, wie z. B. Baumart, Alter, Höhe, evtl. vorhandene Schäden und deren Schadensumfang, sind anhand festgelegter Listen in vorgefertigte Sachdatenformulare einzutragen. Zusätzlich müssen neu angelegte Inventurpunkte und vorhandenes Totholz mittels Lage und Eigenschaften aufgenommen werden. Die Eingabe der Inventurdaten ist durch folgende, für SmobGIS relevante Eigenschaften, geprägt:

- ➔ fast ausschließlich Eingabe von Ziffern
- ➔ häufig vereinfachte Eingabe durch vorbelegte Tasten möglich
- ➔ grafische Steuerung der Eingabe über Auswahl des Baumes am Display wünschenswert (bisher nur sequentielles Bearbeiten in Reihenfolge der Baumnummer möglich)

Raumbezug, Einmessung und Koordinatenqualität von Inventurpunkten:

Im Standardverfahren der BayStaFV wird über die *Inventurkarte* (z.B. Forstbetriebskarte 1:10000) ein lokales, einheitliches quadratisches Gitternetz (*Inventurgitter*) gezeichnet, so dass eine gleichmäßige Verteilung der Stichprobenpunkte erreicht wird (s. Abb. 4-14). Seine Eigenschaften orientieren sich an den Vorgaben durch die *Inventurklasse*, in der die wesentlichen Inventurparameter, wie beispielsweise der Gitterabstand der Inventurpunkte, festgelegt sind. Die Gitterlinien verlaufen von Nord nach Süd und von Ost nach West. Die horizontalen Gitterlinien werden von Süden nach Norden fortlaufend durchnummeriert, die senkrechten von Westen nach Osten. Das Inventurgitter ist so anzulegen, dass sich ein Gitterlinienschnittpunkt mit der Nordwestecke einer Flurkarte 1:5000 (FK5) deckt, wobei dies nicht der Ursprung des Inventurgitters sein muss. Somit orientiert sich das Inventurgitter automatisch am Blattschnitt der FK5, die in Bayern auf dem Soldner-Koordinatensystem basiert. Ist das Inventurgebiet auf mehrere

Kartenblätter der Forstbetriebskarte verteilt, dann kann für jedes Kartenblatt ein eigenes Gitter definiert werden, wobei sich wieder ein Schnittpunkt mit der NW-Ecke der jeweiligen FK5 decken muss. Die Kartenblätter sind durchnummeriert und in der *Verfahrenssteuerung*, die den digitalen Datenfluss des Inventurverfahrens in der BayStaFV regelt, einzutragen. Um die Lage der Inventurpunkte innerhalb Bayerns bestimmen zu können, werden sog. *Bayernkoordinaten* verwendet. Sie setzen sich aus der Kartennummer für jedes festgelegte Gitter, den lokalen Gitter-Koordinaten des Einhängepunktes und der Nummer der Flurkarte, deren Nord-West-Ecke sich mit dem Einhängepunkt deckt, zusammen. Die folgende Tabelle 4-3 gibt hierzu ein Beispiel für die Bayernkoordinate 01008022-02038063.

Kartennr.	Links	Oben	Region	Schicht	Reihe
1	8	22	2 (=NO)	38	63

Tabelle 4-3: Beispiel Bayernkoordinate

Über diese Angaben erhält man für jeden Gitterpunkt die Soldner-Koordinaten und mittels einer geeigneten Transformation die für Inventurzwecke in Bayern ausreichend genauen GK-Koordinaten [BAUER 1995]. Genauer betrachtet, handelt es sich hierbei um **konstruierte Punkte** mit theoretisch exakten Koordinaten. Diese werden in die Örtlichkeit übertragen, mit Hilfe von Rohrmarken und/oder Magneten dauerhaft vermarktet und eventuell mit Farbbändern an den umliegenden Bäumen markiert. Zu den hierfür bisher eingesetzten Messverfahren sind vor allem die einseitigen, an markanten Wegkreuzungen oder Grenzsteinen angehängten Polygonzügen zu zählen (s. Abb. 4-16). Sie werden im Nationalpark mit Kompass und Ultraschallentfernungsmesser gemessen und in analoger Form dokumentiert. Der Verlauf des Zuges orientiert sich bis zum ersten Punkt des Inventurgitters vor allem entlang besonderer, topographischer Gegebenheiten wie Bestandsgrenzen oder Steige. Anschließend wird versucht, möglichst direkt von Inventurpunkt zu Inventurpunkt zu messen. Eine Einmessskizze von dem verwendeten Einhängepunkt oder auch vom Verlauf des Zuges wurde im Nationalpark nicht angefertigt, was ein späteres Auffinden der Inventurpunkte erschwert, vor allem wenn der Einhängepunkt (E) vollständig zerstört ist.

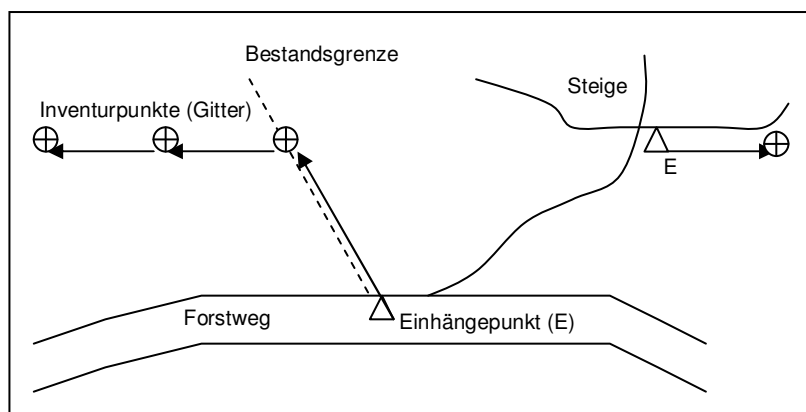


Abbildung 4-16: Einmessung Inventurpunkte mit einseitigen Polygonzügen

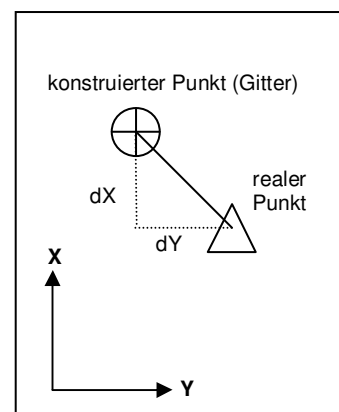


Abbildung 4-17: konstruierter vs. reale Inventurpunkt-Koordinate

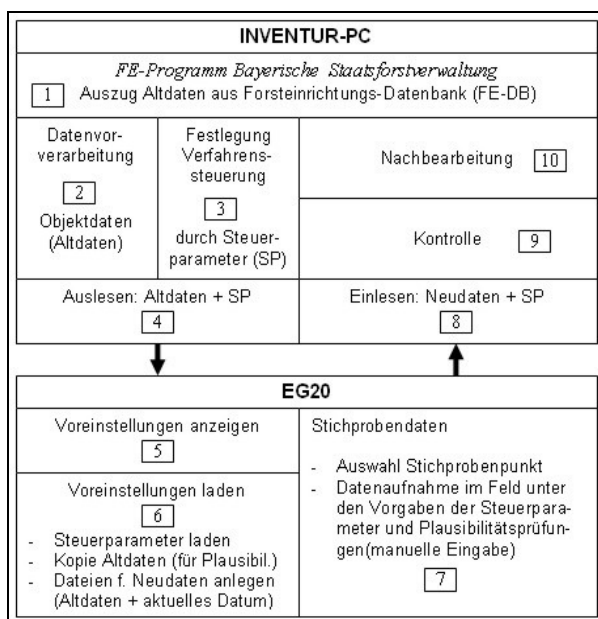
Im Nationalpark Bayerischer Wald liegen die Bayern- und die daraus abgeleiteten GK-Koordinaten der konstruierten Punkte des Inventurgitters flächendeckend im Referenz-GIS vor, während Soldner-Koordinaten nur für einige Teilgebiete existieren. Allerdings stellen die im Gelände vermarkten Punkte den **realen Inventurpunkt** dar, der in der absoluten Lage eine Abweichung von mehreren Metern in Bezug auf den konstruierten Punkt aufweisen kann (s. Abb. 4-17). Diese ist in der Regel nicht digital dokumentiert, denn in der *Forsteinrichtungsdatenbank (FE-DB)* der BayStaFV wird dem Inventurpunkt lediglich die „konstruierten“ Koordinaten zugeordnet. Für das flächenorientierte, statistische Inventurverfahren ist die absolute Positionsgenauigkeit auch von untergeordneter Bedeutung, so lange sichergestellt ist, dass der Punkt die vorgesehene Fläche im Bestand (Kollektiv von Bäumen auf einer Mindestfläche, die eine einheitliche Behandlung ermöglicht [KRAMER 1980]) eindeutig repräsentiert. In der Praxis treten hierdurch aber bei anderen raumbezogenen Fragestellungen bzw. Analysen oder beim Auffinden der Inventurpunkte in dem stellenweise schwer begehbaren Naturwald Schwierigkeiten auf, da die Lagedifferenz zwischen konstruiertem und physischem Punkt zu groß ist. **Daher ist eine digitale Verwaltung der realen Punkte mit ausreichend genauer, absoluter Position zukünftig von zentraler Bedeutung [CZAJA 2003a].**

Auffinden von Inventurpunkten:

Das Auffinden von permanenten Inventurpunkten erfolgte bisher über die analoge Kombination von relativen, geometrischen Messelementen (Kompass, Ultraschallentfernungsmesser, Fadenzähler oder Schrittmaß) und grafischen/alphanumerischen Objektinformationen sowie diversen analoge Karten für die Orientierung im Gelände. Bei der Standardinventur sind dies die Inventurkarte und der Baumplot, während im Praxisalltag der NPV auch oft die *Waldfunktionskarte* mit aufgedrucktem Inventur-Gitternetz im GK-Koordinatensystem verwendet wird. Ausgehend vom bekannten Einhängpunkt oder anderen markanten topographischen Punkten wird versucht, möglichst nah an den Punkt zu navigieren, um anschließend den vergrabenen Magneten mit Hilfe eines Detektors zu finden (Reichweite < 5m). Liegen genügend Informationen über die Bewuchssituation am Inventurpunkt vor und ist diese auch ausreichend durch viele unterschiedliche Baumarten strukturiert, dann ist eine Navigationsgenauigkeit von ca. 20 m ausreichend. Die weitere exaktere Lokalisierung des Punktes erfolgt über einen Umgebungsvergleich und unter Einsatz des Magnetdetektors. Das Auffinden benachbarter Inventurpunkte gestaltet sich auf Grund der durch das Inventurgitter vorgegebenen, geometrischen Messelemente einfacher, so lange die Topographie und Vegetation ein möglichst direktes Angehen des nächsten Punktes erlauben. Diese Unflexibilität stellt aber auch den großen Nachteil des hier beschriebenen Verfahrens dar. Sobald die Situation vor Ort ein Abweichen von der vorgegebenen Wegplanung erzwingt, dann stehen keine aktuellen Messparameter für die Neuberechnung einer Alternativroute zur Verfügung. Zeitaufwändige Umwege sind die Folge.

Digitaler Datenfluss „Inventur“:

Der digitale Datenfluss des Inventurverfahrens der BayStaFV nutzt im Wesentlichen einen zentralen Datenpool (FE-DB) und Kommunikationsrechner am StMLF, einen dezentralen FE-Rechner (Inventur-PC) sowie das mobile Datenaufnahmegerät EG20 [KLEY, THANBICHLER 1999]. Hinsichtlich einer zukünftigen Bearbeitung der Forsteinrichtungsinformationen mit SmobGIS müssen Daten in die zwei Hauptkategorien *Objektdaten* und *Steuerparameter* unterteilt werden: *Objektdaten* stellen im Inventurverfahren reine alphanumerische Sachdaten dar. Es werden keine geometrischen oder topologischen Informationen in Form von Vektor- oder Rasterdaten in der FE-DB verwaltet oder erfasst. Für die Feldaufnahme wird lediglich anhand der Informationen aus der Sachdatenbank für jeden Inventurtrupp der o. g. Baumplot generiert, so dass eine Übersicht der letzten Inventuraufnahme in analoger Form zu Übersichts- und Kontrollzwecken vorliegt. Die *Steuerparameter* entstammen einer komplexen Verfahrenssteuerung, die in über zwanzig Jahren bei der BayStaFV entwickelt und softwaretechnisch im Forsteinrichtungsprogramm der Bayerischen Staatsforstverwaltung realisiert wurde. Die Steuerparameter haben einen direkten Einfluss auf die Attribute der Inventurobjekte bzw. auf die im Feld durchzuführenden Plausibilitätsprüfungen. So werden beispielsweise bei der Vorverarbeitung der Altdaten die Baumhöhen auf das aktuelle Jahr hochgerechnet oder die bei der letzten Inventur neu erfassten Baumobjekte in die richtige Datensatzreihenfolge gebracht. Deshalb ist immer eine gemeinsame Betrachtung und Bearbeitung notwendig.



Der derzeitige digitale Datenfluss zwischen Inventur-PC und mobilen digitalen Datenaufnahmegerät EG20 lässt sich in zehn Arbeitsschritte unterteilen und ist in Abbildung 4-18 dargestellt. Auf Grund der Komplexität des Verfahrens muss an dieser Stelle allerdings auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet werden. Weitere Informationen zu den einzelnen Arbeitsschritten finden sich in den o.g. Literaturquellen zum Inventurverfahren. In Bezug auf das Referenz-GIS ist festzustellen, dass die für den vollständigen Ablauf einer Waldinventur notwendigen Daten bzw. Verfahrensparameter nicht vollständig implementiert sind, da die Forschungsplattform nur zur Analyse der Ergebnisse einer Forsteinrichtung und nicht zu deren Erfassung genutzt werden soll. Auch der Geodatenserver konnte diese Informationen bis zum Projektende für SmobGIS nicht zur Verfügung stellen.

Abbildung 4-18: Digitaler Datenfluss Standardinventurverfahren BayStaFV

b) Einmessung von Inventurpunkten mit GPS:

Bisher kein Workflow bei der NPV vorhanden !

c) HTO-Projekt 33-8: Pass- und Inventurpunktbestimmung (Sonderanwendungen)

Bisher kein Workflow bei der NPV vorhanden !

Soll-Analyse:**a) Inventurverfahren NPV:**

Voruntersuchungen im Rahmen der beiden Diplomarbeiten [NONNENMÜHLEN 2001] und [KÖGLMEIER 2001] haben gezeigt, dass der Einsatz eines sensorgestützten mobilen GIS im Rahmen einer Inventur im Nationalpark Bayerischer Wald möglich und sinnvoll ist, wobei folgende Aspekte zu beachten sind:

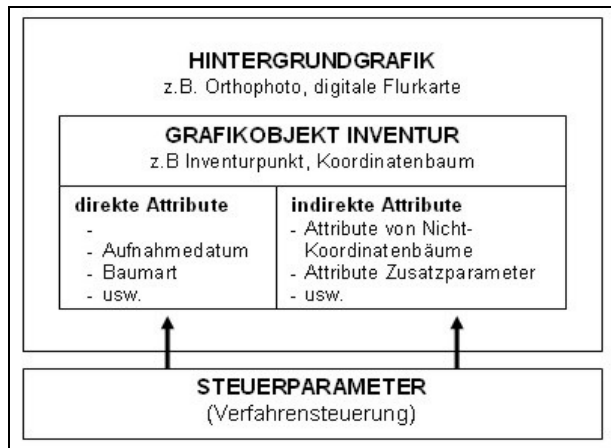


Abbildung 4-19: Inventur-Datenkategorien SmobGIS

Im Gegensatz zu dem rein alphanumerisch-basierten Aufnahmeverfahren mit dem EG20 ist beim Einsatz von SmobGIS ein Inventurobjekt als grafisch visualisiertes Geoobjekt (= *Grafikobjekt*) zu verstehen, das durch die notwendigen Geoinformationen hinsichtlich seiner Geometrie, Topologie, Thematik oder Dynamik beschrieben ist. Im Fall der Waldinventur handelt es sich ausschließlich um *Punktobjekte*, deren thematische Bedeutung durch Attribute in direkter und indirekter Beziehung zugeordnet werden können. Unter *indirekte Attribute* fallen hierbei Objekte deren Raumbezug über ein anderes Objekt definiert ist und sie deshalb selbst nicht grafisch dargestellt werden (z.B. sog. Nicht-Koordinatenbäume).

Die *direkten Attribute* hingegen stellen die Sachdaten der zu visualisierenden Objekte dar, wie beispielsweise bei einem Inventurpunkt oder Koordinatenbaum. Ziel muss die Darstellung der Objekte in Form eines Baumplots sein, der bisher in analoger Form bei der Aufnahme im Feld verwendet wurde. Neben den Grafikobjekten und den Steuerparametern aus der Verfahrenssteuerung käme noch die Datenkategorie *Hintergrundgrafik* hinzu. Hierzu sind diverse Vektor- oder Rasterdaten (z.B. Orthophoto, Digitale Flurkarte, Topographische Karten) für Orientierungs- und Navigationszwecke zu zählen. Eine Übersicht der in SmobGIS zu verwendenden Datenkategorien gibt die Abbildung 4-19. Auf Grund der in der Ist-Analyse angesprochenen Komplexität und der fehlenden vollständigen Informationen im Referenz-GIS respektive Geodatenserver konnte bei der Umsetzung des digitalen Datenflusses „Inventur“ mit SmobGIS der Aspekt der Verfahrenssteuerung nur exemplarisch berücksichtigt werden. Eine praxistaugliche Realisierung dieses über Jahrzehnte entwickelten und hochkomplexen Verfahrens für den unmittelbaren Einsatz in der Staatsforstverwaltung hätte die im Projekt zur Verfügung stehenden Kapazitäten bei weitem überstiegen und ist auch nicht das Ziel des HTO-Projektes. Der Schwerpunkt des Projektes lag vielmehr

darin, Wege und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie man effizient und zuverlässig die Geometrie von Objekten unter forstlichen Bedingungen erfassen kann und welche Vorteile diese Informationen insbesondere in Verbindung mit einer grafischen Visualisierung inklusive einer Sachdateneingabe und Plausibilitätsprüfungen im Feld bieten (s. Kap. 4.3). Daher ergibt sich im Vergleich zum oben beschriebenen Datenfluss des Inventurverfahrens der Bayerischen Staatsforstverwaltung der in der Abbildung 4-20 dargestellte Datenfluss für die prototypische Realisierung von SmobGIS.

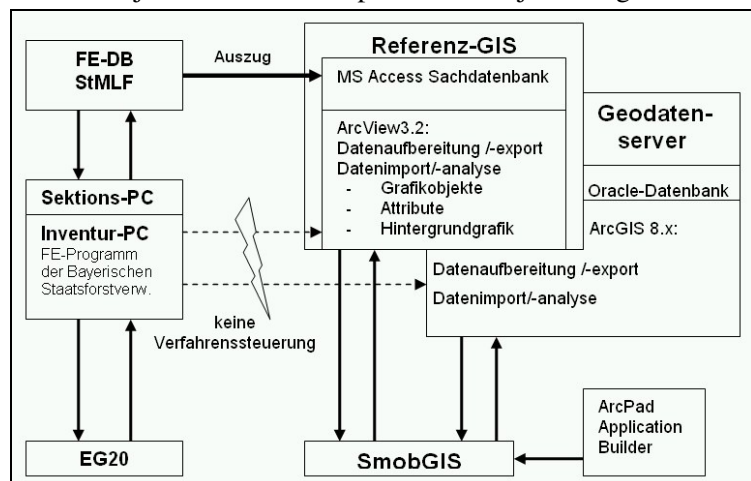


Abbildung 4-20: Digitaler Datenfluss „Inventur“ mit SmobGIS

Auffinden und Einmessung von Inventurpunkten:

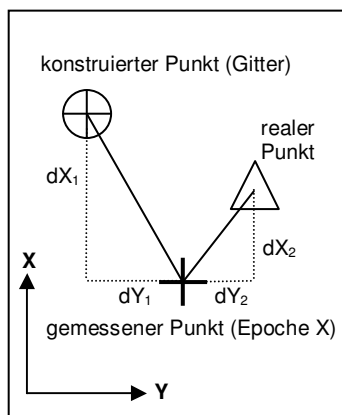


Abbildung 4-21: Inventurpunkttypen

Neben den in der Ist-Analyse beschriebenen konstruierten und (nicht dokumentierten) realen Koordinaten eines Inventurpunktes entstehen beim Einsatz von SmobGIS oder anderen modernen Positionierungsverfahren **gemessene** Koordinaten (s. Abb. 4-21). Abhängig vom eingesetztem Messverfahren bzw. Messsensor erfolgt die Koordinierung eines bereits existierenden realen Punktes zu einer bestimmten Epoche mit einer bestimmten absoluten Genauigkeit. Der gemessene Punkt weicht somit von der wahren Position des realen als auch von der theoretischen Position des konstruierten Gitterpunktes ab. Wird zukünftig die Neuanlage von Inventurpunkten mit den o. g. Verfahren durchgeführt, dann entspricht der reale dem gemessenen Punkt, der je nach Messgenauigkeit von der Vorgabe abweicht. Die hier diskutierten Abweichungen können hinsichtlich der späteren Verwendung des Punktes von großer Bedeutung sein.

Werden beispielsweise wie beim HTO-Projekt 33-8 verschiedene Datenschichten (Waldinventur, Fernerkundung, Laserscanning) bei einer raumbezogenen Analyse über die Inventurpunkte miteinander verknüpft, dann müssen die Punkte mit einer dafür ausreichenden absoluten (gemessenen) Genauigkeit vorliegen. ***Deshalb ist zukünftig neben den bisherigen konstruierten Koordinaten der Inventurpunkte auch die Verwaltung von gemessenen Koordinaten in der FE-DB zu empfehlen [CZAJA 2003a].***

Grundsätzlich hat der Einsatz von SmobGIS Verbesserungen im Verfahrensablauf und in den Ergebnissen der Waldinventur zum Ziel. Eine Befragung von Forstmitarbeiter bei der Waldinventur 2002 im Nationalpark ergab hierzu folgende wichtige Erkenntnisse bzw. Vorgaben [CZAJA 2003b]:

- ☞ Genauigkeiten: Auffinden von Inventurpunkten 5-10m, Einmessung von Inventurpunkten 1-3m, Aufnahme der Inventurobjekte im Probekreis 1-2dm.
- ☞ Raumbezug: Bayerisches Landeskoordinatensystem nach Gauß-Krüger.
- ☞ Grafische Informationen in Form von Lageplot und/oder Inventurkarte sind zum Auffinden der Inventurpunkte absolut notwendig. Eine daran angelehnte digitale, grafisch gestützte Durchführung der Navigation zu Inventurpunkten und der Objekterfassung im Probekreis wird als arbeitserleichternd und zeitsparend angesehen.
- ☞ Eine zuverlässige, absolute Positionierung wäre sehr hilfreich, da die alten Einmessprotokolle oft zu wenig oder falsche Angaben über den alten Zugverlauf aufweisen. Außerdem ist eine flexible Routenwahl möglich, die vor allem in den Bereichen der Windwurfflächen die Sicherheit für den Inventurtrupp erhöht.
- ☞ der Ausrüstungsumfang (GPS/SmobGIS + Inventurgeräte) wird im unwegsamen Gelände kritisch gesehen und ist bestmöglichst zu optimieren. Vor allem ist auf eine hohe Ergonomie des mobilen GIS zu achten, da es sich vorwiegend um eine dynamische Anwendung handelt.

b) Einmessung von Inventurpunkten mit GPS:

Erstmalig wurden auf Anregung des Verfassers bei der Waldinventur 2002 im Nationalpark drei Inventurtrupps verschwuchsweise mit GPS-Empfängern vom Typ GS50 (Leica Geosystems) ausgerüstet, um die bestehenden permanenten Inventurpunkte einzumessen. Dabei sollte die Frage geklärt werden, ob und wie GPS für die Inventurpunktaufnahme unter den gegebenen Bedingungen im Nationalparkgebiet effizient eingesetzt werden kann. Hierzu war neben den im Kapitel 5 beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einsatz von GPS unter forstlichen Bedingungen vor allem ein Arbeitsablauf zu realisieren (s. Kap. 7.4.1), der den folgenden Anforderungen der NPV-Mitarbeiter gerecht wurde:

- ☞ Positionsgenauigkeit von 1-5 m, Raumbezug: ETRS89-Koordinatensystem.
- ☞ vertretbarer Zeitaufwand, d.h. Durchführung parallel zur Inventuraufnahme, mehrfaches Angehen eines Punktes vermeiden, möglichst geringe Vorbereitungs- und Nachbearbeitungszeit im Büro.
- ☞ einfache Bedienung, hohe Zuverlässigkeit und gute ergonomische Eigenschaften des GPS-Systems.
- ☞ Definition eines geeigneten Genauigkeitskriteriums als Abbruch- bzw. Bewertungskriterium für die Messungen im Feld, damit diese effizient von den Forstmitarbeitern durchgeführt werden können.
- ☞ ausreichende, digitale Dokumentation von Mess- und Punktinformationen im Sensor.
- ☞ einfaches und effizientes Datenaustausch und -sicherungskonzept

c) HTO-Projekt 33-8: Pass- und Inventurpunktbestimmung (Sonderanwendungen):

Das Ziel des HTO-Teilprojektes 33-8 war es, das Potential unterschiedlicher Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen, insbesondere des flugzeuggetragenen Laserscannings, der digitalen Luftbilddauswertung und der terrestrischen Stereophotogrammetrie zu überprüfen und durch Kombination der aus den verschiedenen Verfahren abgeleiteten Daten(-schichten), einen optimierten Methodenmix für die Ableitung von Waldstrukturen zu entwickeln [KENNEL 2001]. Durch diese Kombination und einer zusätzlichen Verzahnung mit moderner, mobiler Mess- und GIS-Technik (HTO-Projekt 33-2) sollte es möglich werden, schneller und kostengünstiger als bisher, wichtige Informationen für Entscheidungen zum Nationalparkmanagement zur Verfügung zu stellen. Hierfür wurden vier bis zu 1200 ha große Testgebiete im Nationalparkgebiet definiert und im Frühjahr sowie Sommer 2002 befliegen. Gleichzeitig erfolgte eine detaillierte und präzise Aufnahme der waldökologischen Objekte durch terrestrische Aufnahmetrupps auf mehreren in den Testgebieten definierten Untersuchungsflächen als Vergleichsdatenbestand. Für die anschließende raumbezogene Analyse der einzelnen Datenschichten war sicherzustellen, dass die verwendeten Punktobjekte mit einer für ihren Zweck ausreichenden Positionsgenauigkeit vorlagen. Hierbei musste zwischen Passpunkten (Auswertung Laserscanning, Verknüpfung Luftbilder, Berechnung Transformationsparameter), Inventurpunkten der Waldinventur 2002 und Objektpunkten der Referenzflächen unterschieden werden, da jeweils unterschiedliche Kriterien zu berücksichtigen waren (s. Tabelle 4-4). Anhand der Tabelle wird deutlich, dass sich aus dieser Applikation vor allem konkrete Anforderungen an den Einsatz von GPS unter forstlichen Bedingungen ergeben.

Punkttyp	Kriterium / Massnahme
<i>Passpunkt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Lage- und Höhengenaugigkeit: < 10 cm, Raumbezug: GK-Koordinatensystem, NN-Höhe - großräumige Verteilung der Punkte, d.h. Einsatz des GPS-Messverfahrens für effiziente Aufnahme zwingend erforderlich. - Vermarkung neuer Punkte, da bestehende Trigonometrische Punkte (TP) in vielen Fällen nicht geeignet oder in zu geringer Anzahl vorhanden sind. Dabei müssen möglichst günstige Empfangsbedingungen für GPS beachtet werden, da die GPS-Aufnahmen aus Termingründen im Sommer (Belaubung) durchzuführen waren. - Standpunktauswahl und Einmessung von zwei geeigneten GPS-Referenzstationen für das Alt- und Erweiterungsgebiet des Nationalparks im ETRS89-Koordinatensystem - statische Punktaufnahme, Zweifrequenz-Empfänger, Doppelmessungen (Kontrolle) - lokale Transformationsparameter (ETRS89 -> GK, NN-Höhe) notwendig, da nicht vorhanden. Ableitung mittels 3D-Helmert-Transformation und Quasigeoid über bekannte TP's, die mittels GPS in ETRS89 eingemessen werden müssen (Beachtung der Abschattungssituation am TP!)
<i>Inventurpunkt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Lage- und Höhengenaugigkeit < 1 – 3 m, Raumbezug: GK-Koordinatensystem, NN-Höhe - Aufnahme soweit möglich durch die GPS-Inventurtruppe durch Doppelmessungen (von Abschattungssituation abhängig). Falls notwendig, terrestrische Einmessung mit Tachymeter. - Transformation der Ergebnisse (Transformationsparametern aus Passpunktmessung).
<i>Objektpunkt Referenzfläche</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Lage- und Höhengenaugigkeit < 10 cm - <u>lokale</u> Einmessungen vorhanden oder werden im Sommer 2002 durchgeführt - Anschluss der Flächen an das GK-Koordinatensystem über Polygonzug mit anschließender Lage- und Höhen transformation. Je nach vorliegender Situation können hierfür bestehende TP's oder o.g. Passpunkte verwendet werden. Ansonsten sind mindestens zwei neue, GPS-taugliche Festpunkte einzumessen, auszuwerten und zu transformieren.

Tabelle 4-4: Anforderungen Aufnahmepunkte HTO-Projekt 33-8 (Stand: 08/2002)

4.5.4. Künstliche Nase

Bei der im HTO-Projekt 33-3 zu entwickelnden „Künstlichen Nase“ handelt es sich um eine mobile Plattform mit verschiedenen chemischen und meteorologischen Sensoren zur Messung der Sexuallockstoffe von Borkenkäfern, den sog. Pheromonen. Ziel dieser Methode ist eine wesentlich frühere Detektion des Borkenkäferbefalls bei Bäumen als dies bisher möglich war. Dadurch könnten rascher Gegenmaßnahmen durchgeführt werden, um die Schäden in engeren Grenzen zu halten. Die Analyse der Arbeitsabläufe ergab allerdings, dass *eine direkte Kopplung zwischen SmobGIS und der „Künstlichen Nase“ nicht sinnvoll ist* [CZAJA 2003b], so dass an dieser Stelle auf die Darstellung weiterer Details verzichtet wird. Grundsätzlich wäre ein Datenaustausch, der aus der Analyse der Pheromone resultierenden ASCII-Tabellen, direkt über PC-Speicherkarten oder den Geodatenserver möglich.

4.6. SmobGIS Komponenten

In diesem Kapitel werden die im HTO-Teilprojekt 33-2 für SmobGIS verwendeten Hard- und Softwarekomponenten vorgestellt. Ihre Auswahl erfolgte anhand der Vorgaben aus der Anforderungsanalyse (Kap. 4.5) sowie unter Berücksichtigung der in den Jahren 2000 bis 2003 verfügbaren technischen Lösungen und finanziellen Möglichkeiten innerhalb des Forschungsprojektes.

4.6.1. 3D-Positionierungssystem

Positionierungssystem	Mobilität	3D-Positionierungsart		3D-Positionierungsgenauigkeit		Bemerkungen
	Personen gestützt	direkt (Standpunkt)	indirekt (Zielpunkt)	Navigation (5-20m)	Objekterfassung (10 cm - 5m)	
Map Matching	☹ keine ausreichend detaillierte Datenbasis vorhanden					
GPS / GLONASS	✓	✓	☹	✓	(✓)	Abschattungs- und Mehrwegprobleme
AGPS	✓	✓	☹	(✓)	☹	- Problem Netzinfrastruktur - zu geringe Genauigkeit
LORAN-C	☹	(✓) (nur 2D !)	☹	(✓) (nur 2D !)	☹	- schlechte Ergonomie - geringe Genauigkeit
INS	(✓)	✓	☹	(✓)	☹	Noch keine stabile, personengestützte Feldlösung
GSM-Ortung	✓	(✓) (nur 2D !)	☹	☹	☹	- geringe Netzabdeckung - geringe Genauigkeit
WLAN, RFID	☹ keine Infrastruktur vorhanden					
Terrestrische Polarsensoren	✓	☹	✓	✓	(✓)	evtl. Einschränkungen bei Sichtverbindung/Reichweite
Terrestrische dig. Photogrammetrie	✓	☹	✓	(✓)	(✓)	Noch keine stabile, personengestützte Feldlösung
Pseudolites	(✓)	✓		(✓)	(✓)	Abschattungs- und Mehrwegprobleme

Tabelle 4-5: Bewertung Positionierungstechnologien

Wie in Kapitel 3.4 bereits ausführlich erläutert, stehen eine Vielzahl an Positionierungs- oder Lokalisierungssystemen für Ortungsaufgaben zur Verfügung. Ziel war es nun, für die definierten Anwendungsbeispiele anhand der Vorgaben aus der Anforderungsanalyse geeignete Sensorsysteme und Messverfahren für SmobGIS auszuwählen oder neu zu konzipieren, sowie diese unter praxisnahen Bedingungen auf ihre Eignung hin zu testen (s. Kap. 5 und 6). Werden für eine Bewertung der zur Verfügung stehenden Technologien, die an SmobGIS gestellten Anforderungen u. a. mit

- ☞ *Mobilität*: tragbare, also personengestützte Systeme (möglichst ergonomisch)
- ☞ *3D-Positionierung*: Echtzeit, direkt (Sensorstandpunkt) oder indirekt (relativ zum Sensorstandpunkt)
- ☞ *3D-Positionierungsgenauigkeit*: Unterscheidung zwischen *Navigation* und *Objekterfassung*
- ☞ *Verfügbarkeit*: zuverlässige Positionierung (ausreichend Signalempfang, Netzinfrastruktur etc.)
- ☞ *Preis*: im Hinblick auf spätere Nutzung zu beachten, bei Prototyp-Realisierung noch untergeordnet
- ☞ *Bedienung*: im Hinblick auf spätere Nutzung ist ein „Spezialistensystem“ zu vermeiden

definiert (s. Tabelle 4-5), dann werden diese am besten durch eine **Sensorkombination** aus *GPS*, *Tachymeter* und *handgetragendem 3D-Polarsensor* erfüllt. Dies entspricht auch den Anforderungen der einzelnen Beispielapplikationen, die in einem Pflichtenheft zusammengefasst wurden (s. Tabelle 4-6).

Anwendung	Messaufgabe, -verfahren	Evtl. vorgegebene Sensorik
Dauerbeobachtungsflächen (DbFI)	2D/3D Objektaufnahme (direkt/indirekt), freie Stationierung, Absteckung	Tachymeter, forstliche Messtechnik (kein Online-Anschluss)
Topographische Objekte	Navigation, 2D/3D-Objektaufnahme (direkt/indirekt), (online 3D-) Polygonzug, Schnittverfahren, freie Stationierung	Tachymeter, forstliche Messtechnik (kein Online-Anschluss), GPS, Digitalkamera (optional)
Inventurbezogene Objekte	Navigation, 2D/3D-Objektaufnahme (direkt/indirekt), (online 3D-) Polygonzug, Schnittverfahren, freie Stationierung	GPS, Tachymeter, forstliche Messtechnik (kein Online-Anschluss), Digitalkamera (optional)

Tabelle 4-6: Pflichtenheft Positionierungssystem (Auszug)

GPS stellt hierbei den *Primärsensor* für die anfallenden Navigations- und Erfassungsaufgaben dar. Falls die Messbedingungen keine GPS-Positionierung erlauben, eine höhere Genauigkeit oder eine indirekte Objekterfassung notwendig ist, dann kommen bekannte oder speziell angepasste geodätische Messverfahren mit dem Tachymeter oder dem handgetragenen 3D-Polarsensor zum Einsatz. Vor allem musste eine gegenseitige Stützung von GPS und handgetragenen 3D-Polarsensor (absolute / relative Positionierung) das Ziel sein, um ein flexibles, tragbares, zuverlässiges und ausreichend genaues Positionierungssystem für die Navigation und Objekterfassung unter forstlichen Bedingungen realisieren zu können. Für das zu realisierende, hybride Positionierungssystem kamen die folgenden Produkte zum Einsatz:

GPS

Der Markt bot ein sehr umfangreiches Angebot an GPS-Sensoren an, das von der CompactFlash-Card-GPS über Handheld-GPS bis geodätische Hochleistungssensoren reichte. Eine Auswahl hat daher immer die Kriterien *Ergonomie*, *Empfängertechnologie*, *Genauigkeit + Zuverlässigkeit* sowie *Preis* in Abhängigkeit von den Anforderungen der Applikation zu berücksichtigen. Um die gesamte Bandbreite abzudecken, wurden im Rahmen des HTO-Projektes die in Abb. 4-23 dargestellten GPS Empfänger verwendet.

Tachymeter

Durch die Applikation „Dauerbeobachtungsflächen“ war das Produkt TCR307 der Fa. Leica Geosystems vorgegeben (Abb. 4-22). Details zu den technischen Daten sind im Anhang B aufgeführt.



Abbildung 4-22: TCR307 Abbildung 4-23: GPS CF-GPS (Pretec), etrex Summit (Garmin) und GPS500 (Leica)

Handgetragener 3D-Polarsensor

Für die Auswahl eines 3D-Polarsensors, wurde im Rahmen des HTO-Projektes eine Markt- und Literaturrecherche sowie Testmessungen mit einigen ausgewählten Produkten durchgeführt. Die Auswahl und Durchführung der praktischen Untersuchungen erfolgte nach den Kriterien *Ergonomie*, *3D-Technologie*, *Genauigkeit*, *Zuverlässigkeit* und *Preis*. Es zeigte sich, dass nur eine geringe Anzahl an *praxistauglichen* Lösungen auf dem Markt angeboten wurde. Zwar zeichnen sich alle für den Feldeinsatz konzipierten Geräte durch eine kompakte und robuste Bauweise aus, aber hinsichtlich den ergonomischen Aspekten *Größe* und *Gewicht* ergeben sich Unterschiede, die für den praktischen Einsatz dieser Systeme von Bedeutung sein können [CZAJA 2001]. Testmessungen mit den in Abb.3-28 (Kap. 3.4.4.1) dargestellten Produkten ergaben, dass ein modulares System (Lotstock-Encoder-Kombination) zu unhandlich und die integrierte Lösung eines Messfernglas zu groß und zu schwer für den Einsatz in unwegsamem Gelände sind. Alle getesteten 3D-Polarsensoren sind mit einer seriellen Schnittstelle ausgestattet, so dass für einen automatischen digitalen Datenfluss der Anschluss an eine mobile Recheneinheit gewährleistet ist. Da sich die in den System verwendeten Sensorkomponenten hinsichtlich ihrer Leistungsdaten kaum unterscheiden und die Preise aller drei Produkte sehr ähnlich waren, fiel die Entscheidung zugunsten des *Laser-Ace300* der Firma *MeasurementDevicesLimited (MDL)*, UK (Abb. 4-24).



Abbildung 4-24: Laser Ace 300

Konstruktion	verstärktes Polykarbonat
Dimensionen (LxBxH)	175 x 106.5 x 56 mm
Daten Eingabe/Ausgabe	RS232 mit 4800 oder 9600 Baud
Energie	3V DC 350 mA / 2x AA Batterien intern
Gewicht	600 g
Anzeige	Hintergrundbeleuchtetes LCD Display
Zieloptik	roter Laserpunkt
Schutzklasse	IP65
Betriebstemperatur	-10 °C – 50 °C

Tabelle 4-7: Technische Daten Laser Ace 300 [MDL 2001]

4.6.2. Wearable-Computer, Tablet-Notebook und Handheld-PC

Anwendung	Anforderungen	Sensorik
<i>Dauerbeobachtungsflächen</i>	geringe Mobilität bei der Standpunktaufnahme (statisch), hohe Mobilität bei den Vorarbeiten (dynamisch); großes Display, da kleinräumige Strukturen; viele manuellen Eingaben, Tastatur sinnvoll; eine Sensorschnittstelle	Online-Verbindung Tachymeter; forstliche Messtechnik (manuelle Eingabe)
<i>Topographische Objekte</i>	geringe bis hohe Mobilität , da Einsatz von Standpunktaufnahme bis Erfassung mit Auto möglich; mehrer Sensoren gleichzeitig; weniger manuelle Eingaben; ausgewogene Displaygröße (Gewicht/Tragekomfort/Auflösung).	Online-Verbindung Tachymeter, GPS und 3D-Polarsensor; forstliche Messtechnik (manuelle Eingaben)
<i>Inventurbezogene Objekte</i>	hohe Mobilität , da vorwiegend im dynamischen Einsatz; sehr gute Ergonomie/Tragekomfort notwendig; manuelle Eingaben (Tastatur sinnvoll); mehrer Sensoren gleichzeitig	Online-Verbindung 3D-Polarsensor und GPS; forstliche Messtechnik (manuelle Eingabe), Digitalkamera optional

Tabelle 4-8: Pflichtenheft mobile Recheneinheit (Auszug)

Für die Auswahl einer geeigneten mobilen Recheneinheit wurden alle Anforderungen aus den einzelnen Anwendungsbeispielen in einem Pflichtenheft zusammengestellt. Die Tabelle 4-8 gibt einen Überblick über die wesentlichen Kriterien. Sie zeigt auf, dass die einzelnen Applikationen durch unterschiedliche Anforderungen an eine mobile Recheneinheit gekennzeichnet sind. Fast man diese zusammen, so können daraus Maximalforderungen an die technischen Spezifikationen der mobilen Recheneinheit gestellt werden, die in der folgenden Tabelle 4-9 aufgeführt sind.

Feldtauglichkeit:	<ul style="list-style-type: none"> - Größe: DIN A4 , Gewicht: ~ 1 kg - Einsatztemperaturbereich: - 5 °C bis 60 °C - Schutz gegen Wasser, Staub, Erschütterung
Energieversorgung:	<ul style="list-style-type: none"> - Akkutechnologie: Li-Ion oder Polymer - Akkuanzahl: max. 2 - Betriebszeit: 8 Std. - Wechsel im Betrieb (Swap)
Performance:	<ul style="list-style-type: none"> - Prozessor: > 400 MHz (anwendungsabhängig) - Arbeitsspeicher: > 64 MB (anwendungsabhängig) - Festspeicher: > 2 GB (anwendungsabhängig) - Betriebssystem: Win NT/2000, Win 9x, WinCE mit Pen Service
Bildschirm:	<ul style="list-style-type: none"> - Größe (Diagonale/Auflösung): 8-12'' (Grafik), ab 800 x 600 Pixel - Technologie: Outdoor/Indoor-Readable
Eingabegeräte:	<ul style="list-style-type: none"> - Tastatur: optional; Spracherkennung: optional - Stift: passive Stifte (=Touch Screen)
Schnittstellen:	<ul style="list-style-type: none"> - RS232: mind. 1x, Parallel: nicht unbedingt, USB: mind. 1x, Bluetooth: optional - PC-Card: Ja, Double Slot, CompactFlash: Nein ! - Monitor: optional, Infrarot: optional

Tabelle 4-9: Technische Maximalforderungen an die mobile Recheneinheit

Um die Vor- und Nachteile mobiler PC´s beim Feldeinsatz in einer möglichst großen Bandbreite untersuchen und die Flexibilität von SmobGIS aufzeigen zu können, wurde im Rahmen des HTO-Projektes entschieden, unterschiedliche Typen von mobilen Recheneinheiten einzusetzen. Die Auswahl der mobilen Rechner erfolgte auf der Basis einer umfassenden Literatur- und Marktrecherche sowie diverser Praxistests [CZAJA 2000, CZAJA 2001a/b, CZAJA 2002]. Einen Überblick gibt der Produktvergleich in Anhang A. Soll für alle Anwendungen die gleiche Recheneinheit eingesetzt werden, dann stellt dies die beste Kompromisslösung über alle Applikationen betrachtet dar. Dabei ist aber zu beachten, dass im Einzelfall nicht immer die optimale Funktionalität zur Verfügung steht. Neben dieser Lösung ist auch ein System denkbar, das durch den Austausch einer Komponente flexibel an die speziellen Anforderungen angepasst werden kann (z.B. Displaytausch) oder das den Einsatz von mehreren verschiedenen Gerätetypen ermöglicht, die optimal auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sind. Bei der letzten, im Rahmen des Projektes gewählten Variante, ist eine mögliche Inkompatibilität der Applikationssoftware bei unterschiedlichen Betriebssystemen, mit denen die verschiedenen mobilen Rechner ausgestattet sein können, zu beachten.

Wearable Computer



Abbildung 4-25: ViA II Gürtle-PC mit RS232-Schnittstellenerweiterung

Die Anforderungen hinsichtlich einer sehr guten Ergonomie aufgrund des hohen Mobilitätsbedarf in den beiden Applikationen „Inventurbezogene-“, und „Topographische-Objekte“ werden optimal durch das Konzept der *Wearable Computer* (tragbare Computer) erfüllt, das bereits in Kap. 3-1 näher erläutert wurde. Der Gürtel-PC *ViA II* von der Firma ViA (USA) gehört zu dieser Kategorie und bietet neben einer ausreichend hohen Rechenleistung, Felddauglichkeit und Energieversorgung vor allem einen hohen Tragekomfort. Die drei Komponenten Display, Prozessoreinheit und Akku werden einzeln an einem Hüftgürtel getragen, so dass die Hände für die Fortbewegung im schwierigen Gelände jederzeit frei sind und der Schwerpunkt des Gewichtes kräfteschonend auf der Hüfte liegt. Die Bedienung erfolgt über einen wasserdichten, leichten, robusten und berührungssensitiven Bildschirm mittels (passiven) Stift und virtueller Tastatur. Für den Anschluss von bis zu drei Sensoren gleichzeitig kann das System mit Hilfe einer PC-Card um zwei zusätzliche RS232-Schnittstellen erweitert werden (s. Abb. 4-25). Den Energiebedarf für einen 8-10 Stunden Arbeitstag liefern zwei Lithium-Ionen Akkus. Weitere Informationen zu den technischen Daten des *ViA II* sind im Anhang B aufgeführt.

Tablet-Notebook

Für die Applikation „Dauerbeobachtungsflächen“ war eine mobile Recheneinheit erforderlich, die sowohl für den dynamischen als auch für den statischen Einsatz geeignet ist. Während bei den Vorarbeiten, bei denen der Bearbeiter durch die oft schwer zu begehende Versuchsfläche läuft (s. Abb. 4-26), eher die ergonomische Anforderungen im Vordergrund stehen, sind für die umfangreiche, grafikgestützte Dateneingabe bei der Objektaufnahme vom Tachymeterstandpunkt aus, ein großes Display und einen Tastatur sinnvoll (s. Abb. 4-27). Das *Toughbook CF-18* von der Fa. Panasonic stellt hierfür eine optimale Lösung dar. Durch sein schwenkbares, berührungssensitives Display kann das Gerät einfach von einem Notebook zu einem Tablet-PC umgewandelt werden. Des Weiteren zeichnet sich das Produkt durch ein robustes Gehäuse, geringes Gewicht, Spritzwasserschutz, hohe Rechenleistung und niedrigem Energieverbrauch aus, so dass zwei Akkueinheiten für einen Arbeitstag i. d. R. ausreichen. Als Betriebssystem kam Windows XP von Microsoft zum Einsatz. Weitere technische Informationen finden sich im Anhang B.



Abbildung 4-26: Dynamischer Einsatz Tablet-Notebook



Abbildung 4-27: Statischer Einsatz Tablet-Notebook

Handheld PC

Der PDA *iPaq 3630* (Fa. Compaq) stellte eine preiswerte und sehr handliche Rechenplattform dar, die sich besonders für mobile Einsätze eignet, bei denen geringere Anforderungen hinsichtlich Rechenleistung, Bildschirmgröße und vor allem Feldtauglichkeit gestellt werden. Die Bedienung erfolgt über einen berührungssensitiven Bildschirm mittels (passiven) Stiften und virtueller Tastatur, der sich durch eine brillante Darstellungsqualität bei allen Lichtverhältnissen auszeichnet. Großer Nachteil des mit dem Betriebssystem Windows CE ausgestatteten Rechners ist die fehlende Feldtauglichkeit. Hierfür werden erst seit Mitte 2003 geeignete Geräte angeboten, wie beispielsweise der *Recon* (Fa. Trimble) oder die speziell für den Forsteinsatz konzipierten und deshalb extrem robusten mobilen Rechner *TimbaTec pocket* oder *TimbaTec CE* (Fa. Latschbacher), die im Rahmen des Projektes aber nicht zur Verfügung standen.

4.6.3. Applikationssoftware ArcPad und Konzept digitaler Datenfluss

Die Auswahl der Applikationssoftware erfolgte ebenfalls auf Basis einer umfangreichen Literatur- und Marktrecherche, der Definition eines Pflichtenheftes (Auszug s. Tabelle 4-10) sowie einem Produktvergleich ausgewählter Softwarepakete (s. Anhang A). Die Recherche ergab, dass zwar eine Vielzahl an Softwarepaketen für mobile GIS auf dem Markt angeboten wurde, die Leistungsmerkmale hinsichtlich

- vermessungstechnischen Funktionen (Berechnungsverfahren, Messverfahren)
- Sensoranschlüssen (Tachymeter, GPS, 3D-Polarsensor, ...)
- Konstruktionsfunktionen (CAD)
- Sachdatenkonzept (firmenspezifisch, filebasiert, komplette Datenbank)
- Datenformate inkl. verlustfreien Datenschnittstellen
- offene Systemarchitektur/ Programmierbarkeit
- Betriebssystem
- Preis

aber sehr unterschiedlich ausfielen. Vor allem gab es nur wenige Produkte, die sowohl unter den Microsoft Betriebssystemen Windows 2000/NT/9x als auch unter Windows CE/ Pocket-PC lauffähig waren und über bereitgestellte Funktionen durch den Benutzer angepasst werden konnten. [CZAJA 2001]. Daher wurde für die Realisierung das Softwarepaket *ArcPad* (Version 6.x) der Firma ESRI gewählt. Es zeichnet sich sowohl durch einen flexiblen Einsatz auf allen gängigen Windows-Betriebssystemen als auch durch eine effiziente softwaretechnische Anpassung über gängige Programmiersprachen (VBScript, XML, C++) über ein offenes Objektmodell aus. Außerdem baut die Software auf der ArcGIS-Technologie von ESRI auf, die auch für den Geodatenserver zum Einsatz kommt (durchgängige Software-Plattform).

Anwendung	Eigenschaften	Sensorik
<i>Dauerbeobachtungsflächen (DbFl)</i>	Grafik für Detailobjekte, Datenbank, kein WebGIS, freie Stationierung, polares Anhängen, Formulare	Tachymeter, forstliche Messtechnik (manuelle Eingabe)
<i>Topographische Objekte</i>	Grafik für Navigation/Orientierung, Formulare, Datenbank, geodätische Berechnungen, CAD-Funktionen, WebGIS (opt.)	GPS, 3D-Polarsensor, Tachymeter, forstliche Messtechnik (manuelle Eingaben)
<i>Inventurbezogene Objekte</i>	Grafik für Navigation/Orientierung, Formulare, geodätische Berechnungen, CAD-Funktionen, WebGIS (opt.)	GPS, 3D-Polarsensor, forstliche Messtechnik (manuelle Eingaben), Digitalkamera

Tabelle 4-10: Pflichtenheft Applikationssoftware (Auszug)

Wie bereits in Kap. 4.4.2 erläutert, wird innerhalb der ArcGIS-Produkte mit einer neuen Datenverwaltung und Datenformat (sog. Feature Klassen) gearbeitet, wobei alle bisherigen Datenformate auch weiterhin unterstützt werden. In Bezug auf SmobGIS bedeutet dies, dass der Datenaustausch *filebasiert* im Shape-Format durchgeführt wird, denn *ArcPad arbeitet ausschließlich auf Basis des filebasierten Shape-Formates*. Liegen die Daten in einer sog. Feature Klasse vor oder sollen darin gespeichert werden, so ist eine Umkonvertierung notwendig, die in der Praxis fehlerfrei funktionierte. Somit ergab sich das in Abbildung 4-25 dargestellte Konzept für einen digitalen Datenflusses mit SmobGIS, das

- ☞ einen offline Datenaustausch (z.B. über PC-Cards),
- ☞ die Nutzung von Informationen eines ArcGIS-Internet Map Servers und
- ☞ den filebasierter Datenaustausch über Internet (FTP) oder lokales Netzwerk (LAN) mit TCP/IP

ermöglicht. Diese drei Möglichkeiten bieten ein Höchstmaß an Flexibilität für den Einsatz von SmobGIS in Verbindung mit dem Geodatenserver *und* dem Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“. Grundsätzlich ist dabei ein *verlustfreier* und *konsistenter* Datenaustausch zu gewährleisten, so dass leistungsstarke Kontrollfunktionen (sog. Checkin/Checkout-Funktionen) vom zentralen GIS angeboten werden müssen. Mit Hilfe dieser Funktionen können die gewünschten Bereiche eines zentralen Datenbestandes für die Aufnahme im Feld ausgewählt, mit einer Markierung versehen (Versionierung) und als Kopie für das mobile GIS exportiert werden. Beim Datenimport erkennt das System automatisch die Differenzen zwischen der exportierten und der aktuell importierten Version und gleicht die Daten bei gleichzeitiger Plausibilitätsprüfung ab. Die Firma ESRI bietet eine solche *Entkoppelte Bearbeitung (Disconnected Editing)* [ESRI 2004] erst ab der ArcGIS-Version 8.3 an, die im Rahmen des Projektes nicht zur Verfügung stand und ein sorgsamer (z. B. redundanter) filebasierter Datenaustausch realisiert wurde.

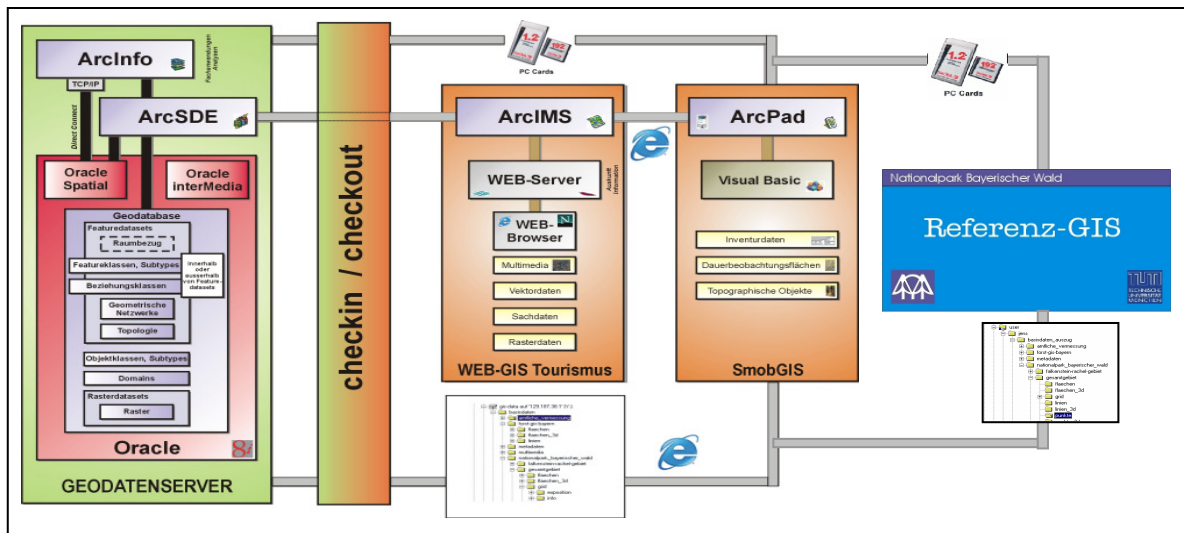


Abbildung 4-28: Konzept digitaler Datenfluss SmobGIS

4.6.4. Datenübertragung mit Mobilfunk

Zu Beginn des Projektes wurde in der angekündigten UMTS-Technologie die Chance gesehen, wechselseitige Aufdatierungen des mobilen Systems respektive des zentralen Servers auch mit großen Datenmengen bewältigen zu können sowie Bildübertragungen zur Fremdidiagnose zu ermöglichen. Die Untersuchungen im Projekt kamen zu dem folgenden Fazit. Sie zeigen, dass sich die großen Hoffnungen, die in die neue Technologie UMTS gesetzt worden sind, nicht einmal verspätet erfüllt worden sind:

- Bei keiner der zu realisierenden Applikationen wurde eine online Datenübertragung zwingend gefordert. Trotzdem wurden die Möglichkeiten auf der Basis von GPRS hierfür exemplarisch untersucht, wobei alle Tests im Bayerischen Wald und im Raum München die von den Herstellern angegebenen Übertragungskapazitäten von bis zu 40 kBit/sec bestätigten [CZAJA 2003b].
- Ein effizienter und wirtschaftlich tragbarer Datenaustausch von größeren Geodatenmengen (> 500 kByte) ist ohne UMTS nicht möglich. Mit GPRS bietet sich lediglich die Chance, ortsbezogene Auskunft- oder Erfassungssysteme mit geringem Datenaufkommen zu realisieren (z. B. Strassenavigation, Störungsmeldung Energieversorgung).
- Wesentlich höhere Datenraten als die aktuellen GPRS-Leistungsangaben sind kurzfristig und vor allem flächendeckend wohl eher unrealistisch, da mit einem flächendeckenden Ausbau von UMTS in den ländlichen Regionen wie den Bayerischen Wald nicht zu rechnen ist. Deshalb ist es in Bezug auf mobile Datenübertragung sinnvoll, nicht nur auf bessere Übertragungstechnik zu bauen, sondern auch bessere Komprimierungstechniken auf der Daten/Server-Seite einzusetzen.
- Neben den erreichbaren Übertragungskapazitäten muss beim Einsatz von mobiler Datenübertragung im Nationalpark Bayerischer Wald auch die *Netzabdeckung* berücksichtigt werden. Die Verfügbarkeit bei Verwendung nur eines Mobilfunkbetreibers weist zum Teil erhebliche Lücken auf. Die bei dem Projekt gemachten Erfahrungen gehen von einer Netzabdeckung von 50–60 % aus, so dass die Daten aus Sicherheitsgründen auch vor Ort vorgehalten werden sollten.

5. Satellitengestützte Positionierung in forstlicher Umgebung

5.1. Einsatzmöglichkeiten und Problembeschreibung

5.1.1. GPS in der Forstwirtschaft

Grundsätzlich stellt der Forst eine „GNSS-feindliche“ Umgebung dar, da es auf Grund der Vegetation zu Signalunterbrechungen bzw. –störungen kommt. Dies führt in der Praxis häufig zu Situationen mit

- fehlende Satelliten = keine Positionierung möglich,
- wenig Satelliten = geringe Positionsqualität,
- „schlechten“ Satellitensignalen = keine Positionierung möglich / geringe Positionsqualität.

Trotz dieser Einschränkungen hat die Forstwirtschaft als einer der großen Flächennutzer bereits frühzeitig die wirtschaftlichen Vorteile der Technologie gegenüber den terrestrischen Verfahren erkannt, so dass seit Anfang der 90er Jahre die Möglichkeiten der Satellitenpositionierung unter forstlichen Bedingungen vor allem in den USA und Kanada sowie in Österreich, Deutschland und Schweden intensiv untersucht, aber auch kontrovers diskutiert werden (z. B. [KLEINN 1993], [SCHWENDT 1994], [KREUTTER 1995], [FERIC 1997], [HAMBERGER 1999], [ENGELS 2001]). Die Kernfrage lautet dabei immer, ob GPS mit einer für die Applikation ausreichend hohen Positionsqualität und Wirtschaftlichkeit im Forst eingesetzt werden kann?

Diese Diskussion wurde auch innerhalb der Bayerischen Staatsforstverwaltung geführt und beeinflusste nicht nur die Entscheidung zur Umsetzung des oben beschriebenen Forschungsprojektes, sondern spiegelt sich auch in den GPS-relevanten Projekthinhalten wieder. Deren Ergebnisse werden als wertvoller Beitrag zu dieser Diskussion gesehen [StMLF 2004], die sich auch in Zukunft fortsetzen wird. Denn durch die permanente Entwicklung von immer leistungsfähigeren GNSS-Hard- und Softwarekomponenten, wie beispielsweise Leica´s ClearTrak-Technik für einen verbesserten Signalempfang unter schwierigen Messbedingungen [STANSEL, MAENPA 1999], oder der kombinierten Nutzung von GNSS-Systemen ergeben sich auch verbesserte sowie neue Einsatzmöglichkeiten. Derzeit wird GPS in der Forstwirtschaft vor allem in der Forsttechnik und Planung eingesetzt [HAMBERGER 2002]. Ausgewählte Beispiele hierfür sind:

Forsttechnik

- ☞ Navigation von Forstmaschinen bei Nacht (bessere Produktivität durch höhere Auslastung)
- ☞ Steuerung und Navigation von Harvester bei der Holzernte (höhere Effizienz und Sicherheit durch Nutzung mobiler GIS, z.B. zur Anzeige von Rückegassen, Hochspannungsleitungen etc.)
- ☞ Optimierung des Holzflussmanagements (z.B. durch Verortung der Holzlager, Frachtfahrzeuge)
- ☞ Forststrassen-Management (Erfassung, Planung, Schadensdokumentation)
- ☞ Navigation und Dokumentation bei luftgestützten Forstbewirtschaftung (Köder, Herbizide, etc.)
- ☞ Verbesserung der Rettungskette (regelmäßige Mitteilung der aktuellen Position an Leitstelle).

Forstliche Kartierung und Planung

- ☞ Grenzvermessung
- ☞ Passpunktbestimmung für die Fernerkundung / Photogrammetrie
- ☞ Aufbau räumlicher Datenbestände für GIS-gestützte Forst-Management-Systeme
- ☞ Forstinventur
- ☞ Umweltvorsorge (z. B. Dokumentation Holzentnahme oder Naturdenkmäler, Biotopschutz)
- ☞ Objekt- und Versuchsflächeneinmessung

Es liegt auf der Hand, dass sich die Positionsqualität und Wirtschaftlichkeit stark gegenseitig beeinflussen und für eine praxisrelevante Bewertung nicht getrennt voneinander betrachtet werden dürfen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll aber weniger auf finanziellen Kriterien, sondern vielmehr auf Aspekten der Praktikabilität und vor allem der Positionsqualität im Forst liegen. Diese ist im Allgemeinen nicht nur durch ihre Genauigkeit und Verfügbarkeit, sondern auch durch Angaben zur Zuverlässigkeit und Integrität definiert (s. Tabelle 5-1). Die Bewertungsmöglichkeiten und -methoden hierfür sind ebenso vielfältig wie die Einflussfaktoren auf die Qualität einer satellitengestützten Position. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Überblick über die relevanten Faktoren zu geben, sowie jene Größen und Verfahren näher zu betrachten, die im Zusammenhang von sensorgestützten mobilen GIS im Forst von Bedeutung sind. Hierbei dienen die im Rahmen des HTO-Projektes definierten Anforderungen an die GPS-Positionsqualität (s. Kap. 4.5) als Ausgangspunkt für die durchgeführten Untersuchungen.

Kriterium	Beschreibung
Genauigkeit (Accuracy)	Maß für die Fähigkeit eines Systems mit einer definierten Sicherheitswahrscheinlichkeit innerhalb vorgegebener Fehlergrenzen zu arbeiten.
Verfügbarkeit (Availability)	Prozentzahl, die in Bezug auf eine Zeitperiode angibt, wie oft das System verfügbar ist
Zuverlässigkeit (Reliability)	Prozentzahl, die angibt, wie lange von einem System erwartet werden kann, dass es die beabsichtigte Funktion mit der erforderlichen Genauigkeit ausführt
Integrität (Integrity)	Fähigkeit eines Systems, den Nutzer rechtzeitig zu informieren, wenn es nur eingeschränkt nutzbar ist.

Tabelle 5-1: Kriterien Positionsqualität [nach RÜFFER, HEMMERT 2005]

5.1.2. Genauigkeits- und zuverlässigkeitsrelevante Einflussfaktoren

Im Zusammenhang mit der Bewertung von GPS-Positionen spricht man häufig von genauigkeits- oder zuverlässigkeitsrelevanten „Effekten“ [GIANNIOU 1996]. Darunter sind vor allem Phänomene, wie z. B. die atmosphärische Refraktion, Mehrwegeeffekte oder relativistische Einflüsse, zu verstehen, wodurch die Pseudostreckenmessung mit Hilfe des Codes oder der Trägerphase als primäre GPS-Messgröße beeinflusst wird. Dieser Zusammenhang lässt sich in der Form von Beobachtungsgleichungen mit dem Index a für einen GPS-Empfänger und i für einen Satelliten wie folgt ausdrücken [MÖSER et al. 2002]:

$$C_a^i = R_a^i + c_0 \cdot \delta_a + S_a^i(C) + \varepsilon_a^i(C) \quad (\text{Gl. 5-1})$$

und

$$\Phi_a^i = R_a^i + c_0 \cdot \delta_a - \lambda \cdot N_a^i + S_a^i(\Phi) + \varepsilon_a^i(\Phi) \quad (\text{Gl. 5-2})$$

mit C_a^i = Codemessung zwischen Empfänger a und Satellite i

Φ_a^i = Trägerphasenmessung zwischen Empfänger a und Satellite i

R_a^i = geometrische Distanz, die sich aus den Satellitenkoordinaten und (unbekannten) Empfängerkoordinaten ergibt

c_0 = Lichtgeschwindigkeit

δ_a = Empfängeruhrfehler

λ = Signalwellenlänge

N_a^i = nicht-ganzzahlige Mehrdeutigkeit der Trägerphase

S_a^i = systematische Fehlereinflüsse auf Code oder Phase, auf Grund des Satellitenuhrfehlers, der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion, Mehrwegausbreitung, Diffraktion

ε_a^i = zufällige Fehlereinflüsse auf Code oder Phase

Demgegenüber schließt der Begriff „Faktor“ aber auch noch andere, die Qualität einer Position beeinflussende Aspekte mit ein, die nicht als „Effekt“ bezeichnet werden können. Hierzu zählen beispielsweise die eingesetzte Empfängerhardware und Filteralgorithmen zur Signalverarbeitung, das verwendete Messverfahren (absolute / relative Positionierung) oder der Auswertzeitpunkt (Echtzeit / PostProcessing).

Kategorie	Einflussfaktor
Atmosphäre	- Laufzeitveränderung Iono- u. Troposphäre
Satellit	- Satellitenuhrfehler - Satellitenbahnfehler
Signal / Sensorik	- Variationen des Antennenphasenzentrums - Mehrwegefehler (Multipath) - Signalstreuung / -beugung (Diffraktion) - Empfängertyp (Ein-/Zweifrequenz)
Geometrie	- Satellitenkonstellation
Mess- / Auswerteverfahren	- Typ des Messverfahrens (absolut/relativ) - Messmodus (statisch/kinematisch) - Beobachtungsgröße (Code/Phase) - Beobachtungsdauer - Auswertzeitpunkt (PostProcessing/Echtzeit) - relatives GPS: Länge der Basislinie - Echtzeit-DGPS: Alter Korrekturdaten

Tabelle 5-2: Einflussfaktoren GPS-Positionsqualität

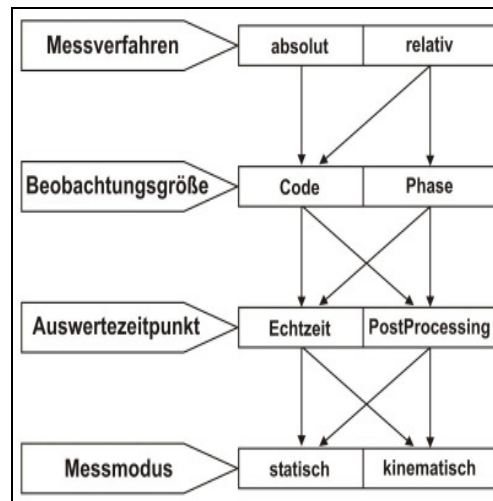


Abbildung 5-1: Allgemeine Einflussfaktoren

Im Allgemeinen wirken sich zahlreiche Faktoren auf die Genauigkeit einer GPS-Positionierung aus, wobei die Größe des Einflusses von den aktuellen Gegebenheiten der Beobachtung abhängt. So haben bestimmte Faktoren, wie beispielsweise die Basislinienlänge, keine Auswirkungen auf die absolute GPS-Positionierung, während sie bei dem differentiellen Beobachtungsverfahren eine wichtige Rolle spielen. Die Tabelle 5-2 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Einflussfaktoren und ordnet diese jeweils einer von fünf definierten Kategorien zu. Davon sind die in der Abbildung 5-1 aufgeführten Einflussfaktoren von grundsätzlicher Bedeutung, da sie den Rahmen für jede GPS-Messung und den daraus resultierenden Größen vorgeben. Vor allem die Wahl des Sensors und des Messverfahrens haben einen entscheidenden Einfluss auf die Positionsqualität und den zur Verfügung stehenden Methoden der Qualitätsanalyse.

☛ GPS-Sensorik

Bei der Auswahl eines geeigneten GPS-Empfängers für den Einsatz als Positionierungssensor in einem mobilen Geoinformationssystemen, sind grundsätzlich die in Tabelle 5-3 aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen. Liegt der Fokus auf der Qualität der Positionierung, dann spielen neben der *Empfängertechnologie* auch das *Datenaustauschformat* und die Möglichkeit der Verwendung von *Positionierungsalgorithmen* eine wichtige und in vielen Fällen nicht ausreichend beachtete Rolle.

Kriterium	Beschreibung
Genauigkeit	Lage- und Höhengenaugigkeit (Einzelepoch/Intervall)
Zuverlässigkeit	z.B. Anzahl gemessener Positionen, Positionsqualität, Ausfall
Empfängertechnologie	L1, L1+L2, (geglätteter) Code, Trägerphase, DGPS/RTK fähig
Datenaustauschformat	firmenspezifisch, NMEA-Standard, NMEA-firmenspezifisch
Ausstattung	Terminal, Datenbank, Rechenfunktionen, graph. Anzeige, nur „black box“
Ergonomie	Größe, Gewicht, Anzahl Einzelkomponenten
Preis	200,- € – 20000,- Euro

Tabelle 5-3: Auswahlkriterien GPS-Sensorik

Warum Datenaustauschformat ?

Um die Qualität einer Position beurteilen zu können, sind neben den 2D/3D-Koordinaten noch zusätzliche Informationen notwendig. Der Inhalt und Umfang dieser Positionsinformationen hängt vom Datenformat ab, das beim Echtzeit-Datenaustausch zwischen dem GPS-Sensor und der Applikationssoftware auf einer mobilen Recheneinheit verwendet wird. Neben der rein computertechnisch relevanten Eigenschaft *binär/ASCII* ist vor allem der Datentyp von großer Bedeutung. Er legt fest, ob *Beobachtungs-* oder *Positionsdaten* übertragen werden und zur weiteren Auswertung zur Verfügung stehen. Während die Nutzung von Beobachtungsdaten eine (eigene) Positionsrechnung mit beliebigem Umfang und Komplexität, und damit auch den verschiedensten Ergebnisinformationen, direkt auf dem Empfänger oder in der Applikationssoftware erlaubt, ist man bei Positionsdaten auf die im Datenformat definierten Parameter angewiesen. Daher muss bei der Bewertung von GPS-Positionsdaten grundsätzlich zwischen Ergebnissen aus dem *Beobachtungs- oder Positionsraum* unterschieden werden, wie Abbildung 5-2 veranschaulicht.

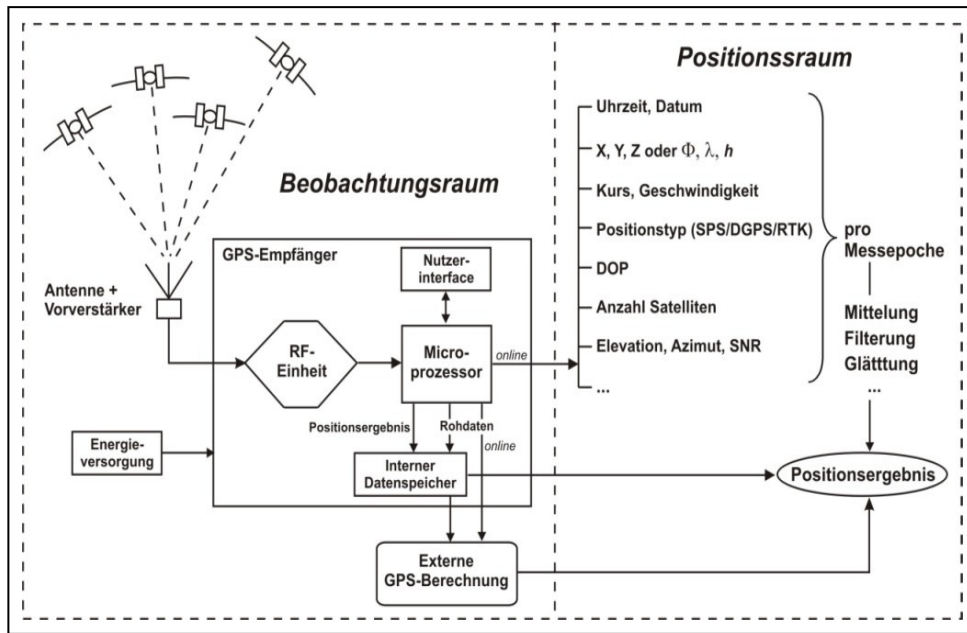


Abbildung 5-2: Definition Beobachtungs- und Positionssraum

Ein weltweit stark verbreiteter Standard stellt das *NMEA-0183 Datenformat* dar. Dieser 1980 erstmals definierte und 1983 weiterentwickelte Industriestandard der *National Marine Electronics Association* ermöglicht die textbasierte Ausgabe von GPS-Positionsinformationen zu jeder Messepoche in Echtzeit. Beobachtungen (Rohdaten) in Form von Pseudostreckenmessungen sind nicht Bestandteil des NMEA-Standards. Durch eine serielle Übertragung können die in verschiedenen NMEA-0183 Datensatztypen definierten Informationen z. B. mit Hilfe des RS232-Protokolles direkt weiterverarbeitet werden, wobei die Anzahl der nutzbaren Datensatztypen von der verwendeten GPS-Hardware und Applikationssoftware abhängt. Die Abbildung 5-3 zeigt einige NMEA-0183-Datensätze als Beispiel, eine komplette Übersicht und Definition der aktuellen NMEA-Standards 0180, 0183 und 2000 findet man z. B. in [NMEA 2006].

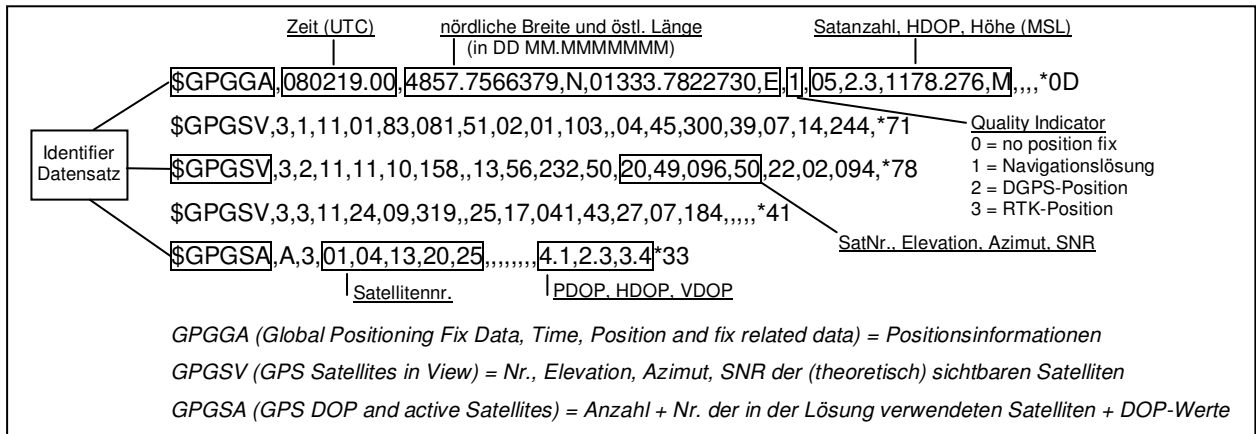


Abbildung 5-3: NMEA-0183 Datensatzstruktur und Beispieldatensätze

Weiterhin ist zu beachten, dass einige Hersteller zusätzlich firmenspezifische Datensätze auf Basis des NMEA-Formates anbieten. Diese enthalten gegenüber den NMEA-Standard-Datensätzen (GPGGA, GPGSV, GPGSA, etc.) oft zusätzliche Informationen, die für eine bessere Qualitätsaussage genutzt werden können. Als Beispiel sei hier die Angabe von statistischen Genauigkeitsparametern wie *Estimated Position Error (EPE)* [GARMIN 1998] oder *Leica's Koordinatenqualität (KQ)* [LEICA 2000]) genannt. Die meisten dem Verfasser bekannten Softwarepakete für mobile GIS nutzen eine NMEA-Schnittstelle mit mehr oder weniger zusätzlichen firmenspezifischen Datensätzen im NMEA-Format. Soll eine mobile GIS-Lösung möglichst **flexibel**, also **empfängerunabhängig** (= herstellerunabhängig) einsetzbar sein, oder bietet der verwendete GPS-Sensor nur die NMEA-Standard-Datensätze an, dann kann die Positionslösung und darauf bezogene Qualitätsangaben auch nur die darin enthaltenen Informationen nutzen.

Warum Positionierungsalgorithmen ?

Werden in der Applikationssoftware NMEA-Datensätze verwendet, dann handelt es sich bei den Positionskordinaten um Lösungen von Einzelepochen. Bei der statischen Punktbestimmung werden diese von den meisten Softwarepaketen mobiler GIS aufsummiert und gemittelt. Einige Produkte bieten zusätzlich Filterfunktionen auf Basis diverser NMEA-Parameter an oder geben eine Warnung aus, wenn eine bestimmte Schranke überschritten worden ist. Erfolgt im Gegensatz dazu die statische Punktbestimmung mit geräteinternen Positionierungsalgorithmen, dann sind die daraus resultierenden Koordinatentripel das Ergebnis hochkomplexer und in der Regel nicht dokumentierter Glättungs- und Filteralgorithmen.

Warum Empfängertechnologie ?

In der Regel werden die Positionen aus den phasengeglätteten Pseudostrecken mit einfachen Echtzeitberechnungsalgorithmen direkt im Empfänger berechnet. Damit können bei der gegenwärtigen Satellitenkonstellation mit dem absoluten GPS-Positionierungsverfahren unter Verwendung von NMEA-Datensätzen Positionsgenauigkeiten von etwa $1\sigma = \pm 10$ m in Echtzeit erreicht werden [STEMPFHUBER 2004]. Betrachtet man die Ablagevektoren einer im kinematischen Messmodus beobachteten Position zu einem koordinatenmäßig bekannten Punkt, dann zeigen sich aber Unterschiede zwischen kostengünstigen Handheld- und hochpreisigen, geodätischen GPS-Empfänger. Grund hierfür sind die Unterschiede in der Signalverarbeitung und in den Positionierungsalgorithmen mit ihren integrierten Filter- und Glättungsverfahren. Die Abbildung 5-4 zeigt hierzu ein Beispiel mit dem *etrex* der Fa. Garmin (phasengeglätteter L1-Code-Handheld-Empfänger) und dem *SR530* von Leica Geosystems (L1-/L2-Präzisions-Empfänger).

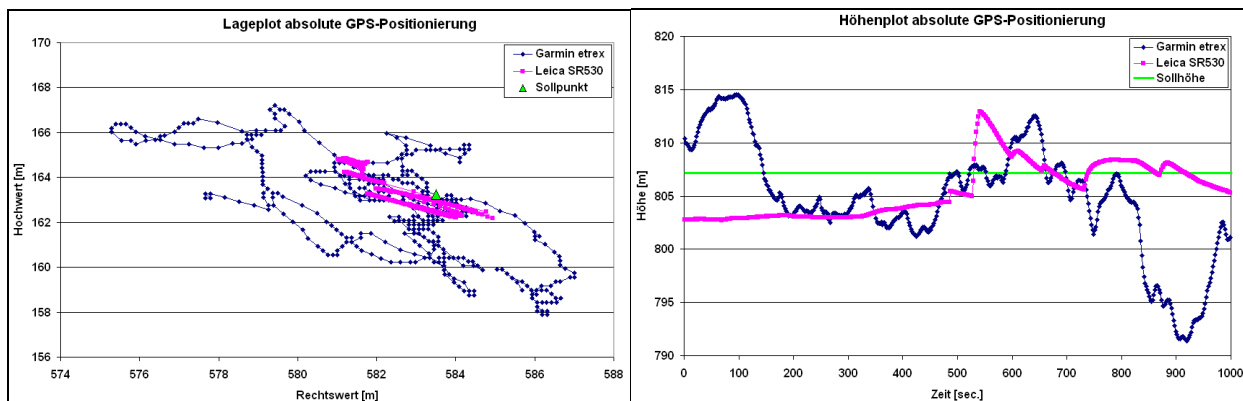


Abbildung 5-4: Empfängervergleich absolute GPS-Positionierung

☛ Mess- und Auswerteverfahren

Neben den bereits in Kap. 3.4.2 erläuterten Unterschieden bei den Messverfahren und Beobachtungsgrößen haben auch der Auswertzeitpunkt und der Messmodus einen nicht unerheblichen Einfluss auf ein GPS-Positionsergebnis. So können beim *PostProcessing* die in einem firmenspezifischen Format epochenweise registrierten GPS-Rohdaten mit Hilfe einer geodätischen GPS-Auswertesoftware berechnet oder nach Konvertierung in das ASCII basierte RINEX-Format [GURTNER 1994] mit individuellen Berechnungswerkzeugen analysiert werden. Dies erlaubt u. a. eine genauere Beurteilung der Rohdatenqualität, die Auswahl eines performanten Lösungsalgorithmusses und die Steuerung der angebotenen Ergebnisinformationen. Beim *statischen Messmodus* werden über einen längeren Zeitraum ohne Veränderung der Antennenlage die Positionen bestimmt oder Rohdaten gesammelt. Aus der Summe dieser Messungen wird anschliessend das Ergebnis über komplexe Mittelbildung, Filterung oder Ausgleichung berechnet und als ein Positionsergebnis ausgegeben. Statische Messungen haben den Vorteil, dass sich Schwankungen in der Position bzw. Beobachtungen nivellieren lassen und dass mit hoher Wahrscheinlichkeit auch unter Kronendach eine ausreichende Anzahl an Satelliten empfangbar ist. Bei der *kinematischen* Messung werden hingegen fortlaufend zu jeder Messepoche Einzelpositionen bestimmt. Dabei ist der Abstand zwischen zwei Messungen abhängig vom eingestellten Zeitintervall zwischen zwei Positionsberechnungen. Da die Antenne bewegt wird, steht jede Position für sich alleine (keine Mittelbildung) und es verändern sich ständig die Empfangsbedingungen. Dies gilt insbesondere im Wald, denn durch die Bewegung werden Satelliten kurzzeitig durch Stämme oder Kronen verdeckt, dichte Stellen im Kronendach wechseln mit lichten Stellen, Verbindungen zu Satelliten werden vom Empfänger verloren und müssen neu aufgebaut werden. Dies trifft in ähnlicher Weise auch bei statischen Messungen an sehr windigen Tagen zu.

Analysiert man die in den vorangegangenen Kapiteln diskutierten Anforderungen und Möglichkeiten der satellitengestützte Positionierung im Forst, dann können die folgenden Feststellungen getroffen werden:

1. Das auf Code-Messungen basierende DGPS-Verfahren in Echtzeit stellt die zentrale, satellitengestützte Positionierungsmethode dar, da es eine für viele Applikationen ausreichend hohe Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit liefert. Letzteres resultiert vor allem aus den gegenüber den genaueren RTK-Geräten wesentlich günstigeren DGPS-Empfängern bei gleichem Personalaufwand.
2. Nutzung des hochgenauen RTK-Verfahrens ist aus verfahrenstechnischer Sicht kritisch, da eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung der hier verwendeten Trägerphasen auf Grund der häufigen Signalstörungen im Wald kaum möglich und damit nicht praxistauglich ist.
3. DGPS-Ergebnisse werden in der Applikationssoftware mobiler GIS meistens in Form von Positionsraumdaten genutzt, so dass nur bestimmte Informationen zur Verfügung stehen. Diese müssen für die Bewertung des Ergebnisses ausreichen, bevor man den mühsam erreichten Ort wieder verlässt.
4. GPS-PostProcessing im Inventurverfahren zu unwirtschaftlich, da oft die personelle Ausstattung fehlt (z. B. NPV) und es zu zeitaufwendig ist (Messung – Auswertung – evtl. Nachmessung -> s. Punkt 3). Nur bei Spezialanwendungen mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen sollte das PostProcessing-Verfahren unter Nutzung von Daten des Beobachtungsraumes eingesetzt werden.

5.1.3. Differentielles GPS-Verfahren in Echtzeit

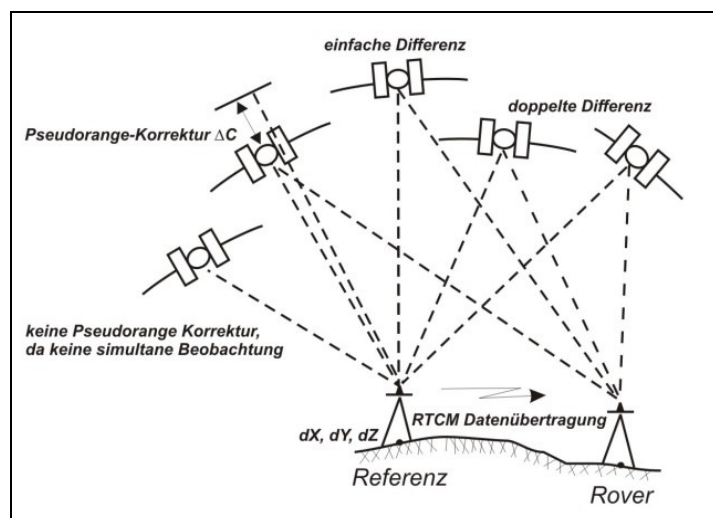


Abbildung 5-5: DGPS-Verfahren in Echtzeit

Will man die Genauigkeit einer *absoluten* GPS-Position (auch *Einzelpunktpositionierung*, *Single Point Positioning (SPP)* oder *Navigationslösung* genannt) steigern, dann müssen die auftretenden Fehlereinflüsse eliminiert bzw. minimiert werden. Dies erreicht man relativ einfach durch die Auswertungen von Differenzen simultaner Messungen, da dann zeitabhängige Fehler ohne signifikante örtliche Variationen herausfallen (u. a. Uhren-, Satellitenbahn- und Laufzeitfehler). Dies ist das Konzept des differentiellen GPS, das auf zwei Arten in Echtzeit ausgeführt werden kann. Ausgangspunkt ist immer ein koordinativ bekannter Referenzpunkt und ein dazu simultan messender GPS-Roverempfänger (s. Abb. 5-5):

1. Auf der Referenzstation können für eine Epoche durch den Vergleich mit Sollwerten Korrekturen entweder für die gemessenen Pseudoranges ($\Delta C/\Delta\Phi$) oder für die Koordinaten (dX, dY, dZ) berechnet werden. Diese werden an den Messungen respektive Koordinaten der Roverstation bzgl. der selben Epoche angebracht, so dass eine relativ zum Referenzpunkt korrigierte SPP-Lösung auf dem Rover berechnet werden kann. Das sog. *Koordinaten-DGPS* birgt allerdings ein Problem, das bei *Pseudorange-Korrekturen* nicht auftritt. Werden auf der Roverstation nicht die selben Satelliten beobachtet wie auf der Referenz, dann gehen die Fehler der Satellitenbeobachtungen, die auf der anderen Station nicht vorhanden sind, voll in die Koordinatenlösung auf dem Rover ein. Dann bewegen sich die Genauigkeiten für die Roverstation nicht mehr bei $\sigma \approx 0,5 \text{ m} + 0,5 \text{ m}/100 \text{ km}$, sondern bei der Genauigkeit einer SPP-Lösung [ZEBHAUSER 2000]. Daher werden bei dem als **DGPS** bezeichneten Verfahren in der Regel korrigierte Code-Pseudoranges des L_1 -Signales verwendet (Gl. 5-3). Für das genauere **PDGPS** ($< \text{dm}$) sind Trägerphasenkorrekturen und die Mehrdeutigkeitslösung notwendig.

$$\hat{C}_{Rov}^i = C_{Rov}^i + \Delta C^i = C_{Rov}^i + (R_{Ref}^i - C_{Ref}^i) \quad (\text{Gl. 5-3})$$

mit C_a^i = Codemessung zwischen Empfänger a und Satellite i

R_a^i = wahre geometrische Distanz aus Satelliten- u. Empfängerkoordinaten

ΔC = Code-Pseudorange-Korrektur

- Höhere Genauigkeiten (dm-m) sind auch durch Differenzbildung von Code- oder Trägerphasenmessungen zwischen einem Referenz/Rover-Empfängerpaar und einem Satelliten (Einfachdifferenz = Elimination Satellitenuhrfehler, Reduzierung Bahn-/Laufzeitfehler) oder dem Empfängerpaar und einem Satellitenpaar (Doppeldifferenz = Elimination Satelliten- und Empfängeruhrenfehler, Reduzierung Bahn-/Laufzeitfehler) zur Messepoche erreicht, wobei höchste Genauigkeiten (cm) nur bei erfolgreicher Mehrdeutigkeitsberechnung der Trägerphasen möglich sind (**RTK**-Verfahren). Da bei Echtzeitanwendungen die Beobachtungsdaten der Referenz auf dem Rover bekannt sein müssen, fallen bei der Datenübertragung höhere Datenmengen an als beim (P)DGPS-Verfahren.

Stationsabhängige Fehler, wie z. B. Mehrwegausbreitungen, Phasensprünge oder Variationen im Antennenphasenzentrum, können mit Hilfe einer Referenzstation nicht bestimmt werden. Außerdem hängt die Verbesserung der Positionsgenauigkeit durch differentielle GPS-Verfahren von der Entfernung zwischen den Stationen ab. Je weiter von der Referenz entfernt, desto schlechter repräsentieren die Beobachtungen der Referenzstation die Fehlereinflüsse auf dem Rover (s. Abb. 5-6). Die Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die relevanten Fehler und deren Auswirkungen auf die absolute und relative GPS-Positionierung. Eine weitere Option zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit differentieller GPS-Verfahren liegt in der Anwendung der virtuellen Referenzstation (VRS) oder von Flächenkorrekturparametern (FKP) vernetzter Referenzstationen. In [WANNINGER 2000] wird sowohl die Fehlermodellierung als auch das Konzept dieser Verfahren zur Verringerung der entfernungsabhängigen Fehler im Detail ausgeführt.

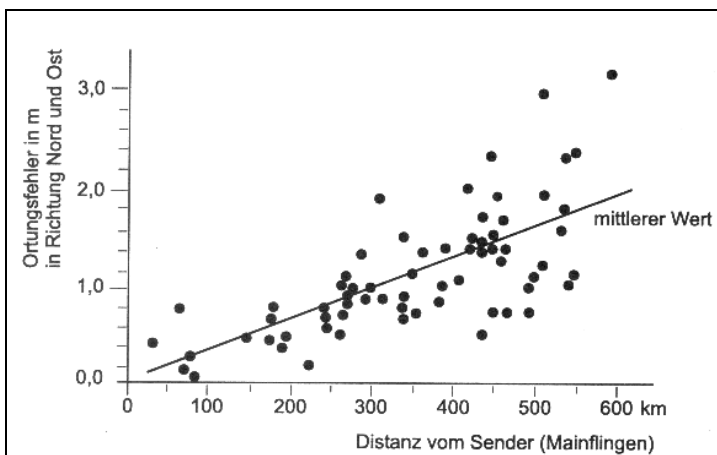


Abbildung 5-6: Distanzabhängiger Fehler DGPS [MANNSELD 1998]

Fehler	GPS (absolut)	DGPS (relativ)
Satellitenbahn	2 – 10 m	0,2 – 2 ppm
Satellitenuhr	1 – 10 m	0 ppm
Ionosphäre	0,5 – 100 m	1 – 50 ppm
Troposphäre	0,01 – 0,5 m	< 3 ppm
Mehrweg Code	~ m	~ m
Mehrweg Phase	mm – cm	mm – cm
Antenne	mm - cm	mm – cm

Tabelle 5-4: GPS/DGPS Fehlereinflüsse [nach WÜBBENA et al. 2000]

Damit die DGPS-Positionierung in Echtzeit erfolgen kann, müssen die auf der Referenz ermittelnden Korrekturen oder Beobachtungen mittels mobiler Datenkommunikation zum Rover übertragen werden. Hierfür hat sich das RTCM-Datenformat (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) als weltweiter Standard etabliert, so dass viele handelsübliche GPS-Empfänger eine nach RTCM spezifizierte Datenschnittstelle anbieten. Derzeit ist Version 3.0 aktuell [RTCM 2004]. Als Übertragungsmedium werden sowohl terrestrische als auch satellitengestützte Kommunikationsverfahren angeboten. So existieren in lokalen oder regionalen Gebieten sog. „Local Area DGPS-Dienste“ (LADGPS), wie z. B. ascos, AMDS, Beacon oder SAPOS, über 2 m-Funk, UKW/LW oder Mobilfunk sowie für globale Korrekturdaten sog. „Wide Area DGPS-Dienste“ (WADGPS), wie OmniSTAR, WAAS, Landstar, Eurofix oder EGNOS, über Satellitenkommunikation oder Loran-C. Bei der Auswahl des Korrekturdaten-Dienstes bzw. Übertragungsmediums ist neben der Genauigkeit, der Kapazität oder den Kosten, vor allem auch auf die Verfügbarkeit zu achten. Die Datenübertragung über Satelliten weist bei Einsatz in Forstgebieten beispielsweise den Nachteil auf, dass die Signale durch den Bewuchs häufig abgeschattet werden. Auch GSM steht mangels ausreichender Infrastruktur in den ländlichen oder alpinen Gebieten nicht flächendeckend zur Verfügung. Radiogestützte Verfahren (LW/UKW/Beacon) bieten demgegenüber eine vergleichsweise gute Abdeckung und sind kostengünstig, können aber nur relativ geringe Datenmengen übertragen (z. B. DGPS Pseudorange-Korrekturen). Zur Nutzung der verschlüsselt und/oder komprimiert ausgesendeten RTCM-Daten ist entweder eine Decoderbox oder eine direkt im Empfänger vorgehaltenen Datenschnittstelle und Registrierung beim Anbieter notwendig. Weitere Details hierzu finden sich bei [DGPS 2006].

5.2. Genauigkeits- und Navigationspotential der GPS-Positionierung im Forst

Seit Oktober 1999 werden am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München Testreihen mit diversen GPS-Sensoren sowie Radio- oder GSM-gestützten DGPS/RTK-Korrekturdatenverfahren im Forst durchgeführt, um das Potential der satellitengestützten Positionierung unter forstlichen Bedingungen näher zu untersuchen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hierbei auf dem Einsatz von unterschiedlichen *Empfängertechnologien* (low cost/high-tech) und *Messverfahren* (PostProcessing/Echtzeit) sowie den Lösungsmöglichkeiten im *Positionsraum*. Speziell für die Auswertung von NMEA-Daten wurde das Auswerteprogramm *KONMEA* (*Konvertierung und Auswertung von NMEA-Daten*) auf der Basis von *Matlab* [MATHWORKS 2005] entwickelt und eingesetzt, das im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben wird. Die Auswertungen im PostProcessing erfolgten mit der GPS-Auswertesoftware *SKI Pro*.

Bevor im Kapitel 5.3 verschiedene Ansätze zur Verbesserung der *Lösungen im Positionsraum* diskutiert werden, soll zunächst das Potential der GPS-Positionierung im Forst anhand verschiedener Empfängertypen und Messverfahren aufgezeigt werden. Die hierfür verwendeten Testpunkte lagen in Waldbeständen mit unterschiedlichen natürlichen Alterklassen sowie Nadel- und Laubbaumarten, so dass unterschiedliche Abschattungssituationen vorlagen (s. Tabelle 5-5). Diese hängen auch im besonderen Maße von der Jahreszeit ab, da während der Wachstumsphase zwischen Mai und Oktober das Laub an den Bäumen wesentlich höhere Signalabschattungen verursacht. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Messbedingungen für GPS-Sensoren in Waldgebieten extrem inhomogen sind und neben standorttypischen Faktoren wie Baumart, Altersklasse, Exposition etc. auch von temporären Einflussfaktoren abhängen (z. B. Feuchte, Wind). Daher werden die Ergebnisse o. g. Testreihen aus Gründen der Übersicht an dieser Stelle in zusammenfassender Form dargestellt.

Natürliche Alterklasse	Beschreibung	Abschattungsgrad	
		Laub	Nadel
<i>Baumholz</i>	Die Bäume im "Baumholz" haben einen Brusthöhendurchmesser > 20 cm. Baumholz wird unterteilt in schwaches Baumholz von 20 bis 35 cm, mittleres Baumholz von 36 bis 50 cm und starkes Baumholz > 50cm.	50-90%	70-90%
<i>Dickung</i>	Als Dickung wird ein junger, dichter, geschlossener Waldbestand bezeichnet, bevor die natürliche Astreinigung, also das Absterben der unteren Äste infolge Lichtmangels, beginnt. Je nach Baumart und Standort sind dies Bestände mit Bestandeshöhen bis zu 10 m.	50-95%	80 – 95 %
<i>Jungwuchs</i>	Jungwuchs kennzeichnet die Entwicklungsphase von der Ansammlung bzw. künstlichen Begründung durch Pflanzung oder Saat bis zum Strauchschicht Stadium (bis 2m).	0-20%	0-20%
<i>Stangenholz</i>	Stangenholz bezeichnet einen jüngeren Bestand von 7 bis 20 cm Brusthöhendurchmesser	60-90%	70-90%
<i>Totholz</i>	Holz von stehenden und liegenden abgestorbenen Bäumen, Ästen oder Baumkronen, das im Wald als Lebensraum und Nährstoffquelle für Pflanzen und Tiere verbleibt	20-70%	20-70%

Tabelle 5-5: Natürliche Alterklassen und Abschattungsgrad von Waldbeständen [nach StMLF 2005]

5.2.1. Genauigkeitspotential unterschiedlicher Empfängertechnologien

In den Testgebieten *Schachtenau* (Nationalpark Bayerischer Wald) und *Eichenau* (bei München) wurden die Positionierungsmöglichkeiten von GPS/DGPS im Wald anhand des *geodätischen Sensors SR530* sowohl im PostProcessing als auch in Echtzeit (SAPOS-ALF-Korrekturdaten) auf 10 koordinativ bekannten Testpunkten untersucht (s. Tabelle 5-6). Neben dem hochpreisigen SR530 kam bei einigen Messreihen auch der *L1-Code-Empfänger GS50*, der *GPS-Handheld etrex Summit* sowie die *GPS-Compact-Flash Card Pretec GPS CF* zum Einsatz (s. Kap. 4.6), wobei die beiden letztgenannten Geräte nur im GPS-Modus eingesetzt werden konnten. Die Nutzung von ALF-Korrekturen ist heute nicht mehr möglich, da dieser SAPOS-Dienst zum 1.1.2006 eingestellt wurde.

Typ/Abschattung Testpunkte	Anzahl
Freifläche (5 %)	1
Baumholz (70-90 %)	4
Dickung (95 %)	1
Stangenholz (70 %)	2
Totholz (20-50%)	2

Tabelle 5-6: Testpunkte Empfängervergleich 1

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Messungen aus dem Beobachtungs- und Positionsraum dargestellt, die an verschiedenen Tagen und mit unterschiedlicher Beobachtungsdauer durchgeführt wurden. Durch eine zusätzliche Variation der Auswerteparameter können sich daher auch mehrere Auswertungen (= Anz. Ausw.) auf einem Testpunkt ergeben. Die Ergebnisse der über alle Testpunkte gemittelten Abweichung in der Lage und der Höhe (dLage/dHöhe) zeigen, dass

- die höchsten Lagegenauigkeiten von <1 m mit dem teuersten Empfänger und mit PostProcessing in DGPS erreichbar sind. Dabei ist allerdings auch der Auswerteaufwand am größten;
- mit DGPS in Echtzeit je nach Empfängertechnologie Genauigkeiten in der Lage von 1-3 m und in der Höhe von 2-4 m erreicht werden können, wobei die Anzahl der registrierbaren DGPS-Positionen (= Anz. Pos.) ein Maß für die Zuverlässigkeit darstellt;
- der GPS-Handheld gegenüber dem hochpreisigen SR530 zwar schlechtere, aber immer noch erstaunlich gute Ergebnisse bei der absoluten GPS-Positionierung liefert.

Messverfahren	Referenz	GPS-System	Auswertung Messgröße	Beob. raum	Pos. raum	Anz. Punkte/ Anz. Ausw.	Beob.-dauer	dLage (Mittel)	dHöhe (Mittel)	Anz. Pos. (Mittel)	
DGPS	lokal (~1 km)	SR530	PostProc Code+Phase, L1+L2	X	-	7/14	28' - 43'	0,18	0,12	-	
						5/10	3' - 31'	0,48	0,76	-	
						5/18	3' - 1h	0,65	0,34	-	
				PostProc Code, L1+L2	X	-	5/5	31' - 1h	0,80	1,65	-
				PostProc Code, L1	X	-	5/10	3' - 30'	0,75	1,38	-
						5/11	31' - 1h	1,22	3,05	-	
	ALF (300 km)	SR530	Echtzeit Code+PRC, L1	X	-	10/10	2' - 10'	0,40	2,30	-	
				-	X	10/10	2' - 10'	1,10	2,60	89 %	
		ALF (350 km)	SR530	Echtzeit Code+PRC, L1	-	X	3/3	7' - 9,5' 19' - 64'	1,47	0,83	93 %
			SR530	Echtzeit Code+PRC, L1	-	X	6/32	1' - 39'	1,27	3,18	84 %
SR530			Echtzeit Code+PRC, L1	-	X	4/5	10' - 26'	1,9	3,3	59,4 %	
GS50	Echtzeit Code+PRC, L1	-	X	4/5	10' - 26'	3,3	4,4	63 %			
GPS	-	etrex	Echtzeit Code, L1	-	X	4/4	43' - 88'	8,04	5,96	98,2%	
		SR530	Echtzeit Code, L1	-	X	5/5	31' - 36'	2,34	6,04	100%	
		etrex	Echtzeit Code, L1	-	X	5/5	31' - 35'	2,96	12,04	92,5%	
		etrex	Echtzeit Code, L1	-	X	5/5	6' - 46'	5,71	16,65	94%	
		GPSCF	Echtzeit Code, L1	-	X	3/3	15' - 22'	6,65	12,40	24,9%	
		etrex	Echtzeit Code, L1	-	X	6/6	19' - 27'	4,72	24,03	99,2%	

Tabelle 5-7: Ergebnisse GPS/DGPS Empfängervergleich 1

5.2.2. Empfängervergleich ST-Forschungsprojekt 93

Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes wurde untersucht, ob mit Hilfe von (D)GPS und einer entsprechenden Software ein mobiles GIS realisierbar ist, das Inventurtrupps ein zeitsparendes Auffinden von Traktpunkten ermöglicht (weitere Details s. Kap. 7.3.2). Neben der Konzeption und Umsetzung des Gesamtsystems waren auch die Einsatzmöglichkeiten von GPS im Wald unter Verwendung von Positionsraumdaten (NMEA) von Interesse. Dafür wurden *sieben GPS/DGPS-Systeme* ausgewählt und auf Testpunkten (*statische Messungen*) sowie einer Testlinie (*kinematische Messungen*) näher untersucht. Bei den Testpunkten handelt es sich sowohl um Traktpunkte der Bundeswaldinventur als auch um speziell in verschiedenen Bestandessituationen angelegte Referenzpunkte im Kranzberger Forst. Die Messungen erfolgten immer mit mehreren Empfängern gleichzeitig, um möglichst homogene Messbedingungen zu gewährleisten. Hierzu wurden die GPS-Antennen auf einer speziellen Platte, die auf einem stabilen Stativ befestigt werden kann, im Kreis platziert (s. Abb. 5-7). Damit ist gewährleistet, dass der unvermeidbare Zentrierungsfehler beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer Antennen unter 0,25 m liegt, und somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat.



Abbildung 5-7: GPS-Antennenplatte

Parameter	Bewertung
Gesamtanzahl der registrierten Positionen (max. 300/900 = 100 %)	Zuverlässigkeit
Gesamtanzahl der DGPS-Positionen (max. 300/900 = 100%)	
Mittlere Lage- und Höhengenaugkeit aller registrierten Positionen (= GPS + DGPS-Positionen)	Genauigkeit
Mittlere Lage- und Höhengenaugkeit der DGPS-Positionen	
Berechnung von 5' und 15'- Intervallen	Messdauer

Tabelle 5-8: Untersuchungsparameter Empfängervergleich 2

Die Beobachtungsdauer betrug bei allen Punkten 15 Minuten, bei einer Messfrequenz von 1 Hz. Vorab waren bei der Empfängerkonfiguration die schwierigen Messbedingungen, soweit dies möglich war, berücksichtigt worden und es wurden möglichst homogene Einstellungen zwischen den Sensoren gewählt. Der Empfang der DGPS- Korrekturdaten erfolgte über Radiodecoder für die SAPOS-Dienste ALF und RASANT. Bei der Auswertung wurden aus dem Datenmaterial zeitgleiche Intervalle zu 5 und 15 Minuten gebildet und die in Tabelle 5-8 aufgeführten Parameter für jeden Empfänger pro Beobachtungspunkt berechnet und untersucht. Die Analyse der Messergebnisse (s. Tabelle 5-9) ergibt:

- eine GPS-Positionierung war bei der Verwendung aller Positionen zu durchschnittlich 80 % möglich. Die Zuverlässigkeit der reinen DGPS-Positionierung fällt mit durchschnittlich 68 % geringer aus, was sowohl an den empfängerspezifischen Einstellungen für die DGPS-Positionsberechnung (z. B. Filtereinstellungen) als auch der Empfangsstabilität der Korrekturdatendecoder liegt.
- Grundsätzlich lassen sich mit den getesteten Messsystemen Genauigkeiten in der Lage von 5 m und in der Höhe von 10 m erreichen. Der teuerste GPS-Empfänger liefert auch hier die höchste Genauigkeit (GS 50). Der Einsatz von DGPS liefert nur in wenigen Fällen eine höhere Genauigkeit als ein Mittelwert aus allen Positionen, zeigt aber, dass mit preiswerteren DGPS-Systemen Genauigkeiten von 1-5 m in der Lage und 5-10 m in der Höhe im Wald möglich sind
- eine längere Beobachtungsdauer ergibt nicht automatisch eine höhere Genauigkeit. Die Unterschiede in der Lage- und Höhengenaugkeit fallen eher gering aus.

Empfänger	Anzahl Punkte	alle Positionen			nur DGPS-Positionen		
		Anz. Pos (Mittel)	dLage (Mittel)	dHöhe (Mittel)	Anz. Pos. (Mittel)	dLage (Mittel)	dHöhe (Mittel)
15'-Intervall							
GS50	22	80,1%	3,23 m	4,42m	53,7 %	3,27 m	6,84 m
Geopexplorer3	17	70,0 %	4,19 m	14,89 m	65,0 %	3,80 m	12,80 m
Geo-kombi12L+	21	92,7 %	4,74 m	11,39 m	83,1 %	4,40 m	11,87 m
GPSII	7	97,2 %	13,89 m	29,96 m	82,9 %	13,63 m	28,08 m
DGPS/LW-Box	22	98,4 %	6,47 m	17,40 m	90,0 %	4,64 m	18,09 m
StarTrack	21	95,9 %	7,77 m	18,66 m	87,0 %	7,60 m	18,16 m
GEOmeter12+	7	35,7 %	4,87 m	16,40 m	35,7 %	4,87 m	16,40 m
5'-Intervall							
GS50	14	73,6 %	2,77 m	5,82 m	51,4 %	2,96 m	8,86 m
Geopexplorer3	10	64,1 %	6,45 m	17,43 m	22,1 %	3,98 m	11,60 m
Geo-kombi12L+	14	93,8 %	5,15 m	8,58 m	69,3 %	5,24 m	8,86 m
GPSII	6	100 %	13,16 m	29,60 m	66,7 %	8,90 m	22,03 m
DGPS/LW-Box	16	99,4 %	5,61 m	16,68 m	94,9 %	5,75 m	16,98 m
StarTrack	16	96,9 %	8,04 m	22,86 m	87,0 %	8,15 m	22,79 m
GEOmeter12+		Empfänger registriert nur DGPS-Positionen, so dass zu wenige Messwerte vorlagen					

Tabelle 5-9: Ergebnisse Empfängervergleich 2

Während des Navigationsvorgangs werden Empfänger und Antenne bewegt. Das bedeutet, dass für jeden Ort auf der Bewegungslinie nur eine Positionsbestimmung erfolgt, die noch dazu unter sich ändernden Empfangsbedingungen stattfindet. Gerade im Wald ändern sich die Empfangsbedingungen wegen der unterschiedlichen Überschilderung bei jedem Schritt. Um die Tauglichkeit verschiedener GPS-Empfänger für die Navigation zu testen, wurde daher eine eigene Versuchsmethodik entwickelt. Dazu wurde ein

Quadrat mit einer Kantenlänge von 300 m in einer Waldfläche vermarktet und eingemessen. Gut zwei Drittel dieser Traktlinie führt durch Nadelholzbestände unterschiedlicher Altersklassen, ein Drittel durch Laubholzbestände. Die Strecke liegt im Tertiären Hügelland. Alle Aufnahmen fanden im Winterhalbjahr statt, so dass in den blattlosen Laubholzbeständen relativ günstige Empfangsbedingungen bestanden. Die Untersuchungslinie wurde markiert und verschiedene Empfänger wurden zeitgleich (bis zu drei Empfänger in einem Rucksack) in mehreren Durchgängen auf dieser Linie getragen (s. Abb. 5-8). Dabei konnte die vorgegebene Traktlinie mit einer Genauigkeit von ca. 1 m eingehalten werden. Die Beobachtungsdauer ergab sich aus der Gehzeit für die 1,2 km lange Traktlinie und betrug mind. 28 Minuten, höchstens 42 Minuten, bei einer Messfrequenz von 1 Hz. Aus den gemessenen Datensätzen wurde für die Auswertung jeder Messkampagne die Summe der gemessenen Positionen, die Anzahl der differentiell korrigierten Positionen sowie die Satellitenanzahl und der HDOP bestimmt. Ferner wurde bei der Auswertung um die Traktlinie ein 10 m breiter Kanal gelegt und analysiert wieviele der gemessenen Positionen in diesen Kanal fallen. Dadurch ist eine Aussage über die "Linientreue" der untersuchten Geräte möglich. Die Breite von 10 m wurde deshalb gewählt, weil sie der durchschnittlichen Größe eines Baumplots bei der BWI entspricht, der das Ziel bei der GPS-Navigation während der Bundeswaldinventur darstellt (s. Kap. 7.2.3).

	StarTrack	DGPS/ LW-Box	GS 50
Summe Positionen	5860	4943	5338
Summe GPS	4124	4943	1512
Summe DGPS	1736	0	3826
DGPS-Rate	30%	0%	72%
Positionen im 10 m-Kanal	1961	3814	4785
Rate	33%	77%	90%
mittl. Sat.zahl	5.5	4.9	5.5
mittl. HDOP	2.0	1.2	2.0

Tabelle 5-10: Ergebnisse kinematische Messungen



Abbildung 5-8: Kinematische Messung Traktlinie

In Tabelle 5-10 sind die Ergebnisse der kinematischen Untersuchungen zu drei Empfängern im Mittel über drei Messkampagnen dargestellt. Berücksichtigt sind nur Messvorgänge bei denen die Empfänger zeitgleich eingesetzt waren. Die meisten Positionen hat der StarTrack aufgenommen, die wenigsten die DGPS/LW-Box. Der GS 50 liegt bei der Gesamt-Empfangsrate genau in der Mitte. 70 % dieser Positionen konnten beim GS 50 differentiell korrigiert werden, während es beim StarTrack nur 30 % waren. Von den DGPS/LW-Box-Positionen wurde während der drei Messkampagnen keine der kinematisch erfassten Position differentiell korrigiert. Der Grund dafür konnte nicht eruiert werden. Dennoch lagen 77 % der mit diesem Gerät erfassten Positionen im 10 m-Korridor, während der StarTrack nur 33% schaffte.

Besonders viele Werte, nämlich 90 % aller erfassten Positionsdaten, wurden vom GS 50 im 10 m-Korridor gemessen. In Abbildung 5-9 sind die gemessenen Positionen der drei Empfänger bei zwei Messkampagnen dargestellt. Alle sechs Aufnahmen bilden das beschriebene 300 m-Quadrat ab. Bei den Aufnahmen mit dem StarTrack ist zu erkennen, dass Streckenabschnitte phasenweise parallel versetzt sind. Die Nordwestecke, die in einer Senke liegt, kann während der Aufnahme 1 vom StarTrack nur sehr unzutreffend abgebildet werden, die Abweichungen liegen bei über 50 m. Dagegen bildet die DGPS/LW-Box den Verlauf weitgehend zutreffend ab. Kennzeichnend bei Aufnahme 1 sind aber Abschnitte in denen die Aufnahmelinie bis zu 30 m aus dem 10m-Kanal läuft anschließend wieder im Kanal weiterzulaufen (z.B. Nordlinie). Während der Aufnahme 2 mit StarTrack und DGPS-Box größere Streckenabschnitte nicht abgebildet werden. Bei der Aufnahme mit dem GS 50 ist die Abbildung des Quadrates am besten getroffen. Seitlichen Ausläufer der Linie bestehen nur in beschränktem Maße, das Quadrat wird vollständig abgebildet, der Kanal wird weitgehend eingehalten.

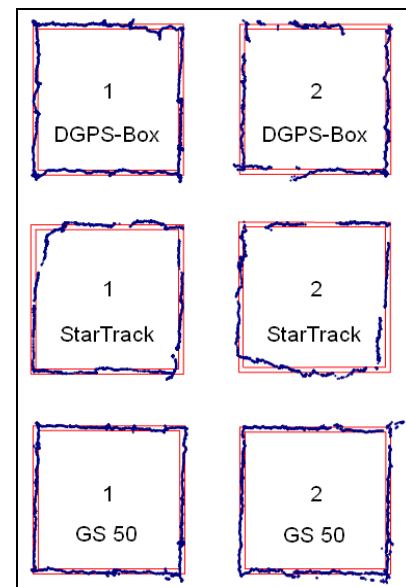


Abbildung 5-9: Ergebnisplots Traktlinie

5.2.3. Untersuchungen von Fragestellungen zur NPV-Inventur

	Fragestellung	Empfänger
1	GPS/DGPS-Positionsgenauigkeit bei statischer Punkteinmessung im Positionsraum (5', 15', 30'-Intervalle) unter vollem Bewuchs ? Zuverlässigkeit des Empfangs von SAPOS-ALF-Korrekturdaten ?	GS50 (Leica Geosystems) GS5 ^{RTCM} (Leica Geosystems) GK12L (CT GmbH)
2	GPS/DGPS-Positionsgenauigkeit bei statischer Punkteinmessung unter Verwendung der <u>Empfängersoftware</u> (5', 10', 15'-Intervalle) ? Übereinstimmung angegebener Genauigkeitsparameter mit Realität ? Zuverlässigkeit des Empfangs von SAPOS-ALF-Korrekturdaten ?	GS50 (Leica Geosystems)
3	GPS-Positionsgenauigkeit statischer Punkteinmessung mit low-cost GPS im Positionsraum (10'-Intervall) ? Navigationspotential low-cost GPS ?	Etrex summit (Garmin)
4	Positionsgenauigkeit und Zuverlässigkeit bei Nutzung von unterschiedlichen DGPS-Diensten in Echtzeit (ALF (Langwelle) / HEPS (GSM)) ?	SR530 (Leica Geosystems)

Tabelle 5-11: Untersuchungsschwerpunkte Empfängervergleich 3

Nachdem die bisher beschriebenen Untersuchungen unter zum Teil günstigen Abschattungsbedingungen stattfanden (Frühjahr/Winter) und eine allgemeine Aussage zum Genauigkeitspotential der GPS-Positionierung im Forst zum Ziel hatten, liegt der Fokus bei den in diesem Kapitel zusammenfassend beschriebenen Untersuchungen auf für die Inventur im Nationalpark sowie für den zukünftigen Einsatz eines SmobGIS relevanten Fragestellungen. Weitere Details hierzu finden sich in [CZAJA 2003].

1) GPS/DGPS-Positionsgenauigkeit bei statischer Punkteinmessung im Positionsraum (5', 15', 30'-Intervalle) unter vollem Bewuchs ? Zuverlässigkeit des Empfangs von ALF-Korrekturdaten ?

Abschattung Testpunkte	Anzahl Messungen
keine-gering	9 (11 %)
gering-mittel	25 (30 %)
mittel-stark	21 (25 %)
stark-sehr stark	29 (34 %)

Tabelle 5-12: Testpunkte Empfängervergleich 3

Hierfür wurden die Antennen der drei GPS-Empfänger ähnlich wie bei dem ST-Projekt auf einer speziellen (tragbaren) Styropor-Konstruktion fixiert (s. Abb. 5-10), die zum einen den Zentrierungsfehler bei Verwendung mehrerer Antennen auf einem Punkt < 0,25 m hält und zum anderen eine zeitgleiche Messung aller Empfänger (zu selben Messbedingungen) gewährleistet. Die ausgegebenen Datensätze im NMEA-Format (*Positionsraum*) wurden direkt via RS232-Schnittstelle auf einem Pen-PC oder Laptop gespeichert.

Die Messungen fanden an koordinatenmäßig bekannten Punkten im gesamten Nationalparkgebiet statt, wobei versucht wurde, möglichst alle Abschattungssituationen (keine - sehr stark/ Laub-, Misch-, Nadelwald) zu berücksichtigen (s. Tab. 5-12). Insgesamt wurden Testmessungen auf 21 Punkten durchgeführt, davon konnten 8 Punkte doppelt beobachtet werden, so dass insgesamt 84 Messungen in die Auswertung einfließen. Diese umfasste u. a. die Berechnung der Abweichungen in der Lage und Höhe durch Bildung des arithmetischen Mittels über das Beobachtungsintervall. Die Resultate bestätigen die bisher gewonnenen Erkenntnisse und lieferten für die 5'-Beobachtungsintervalle sowohl beim GS50 als auch beim GK12L die genauesten und zuverlässigsten Ergebnisse. Die wichtigsten Ergebnisse für diese kurzen Beobachtungsintervalle sind in der Tabelle 5-13 zusammengefasst.

Empfänger	alle Positionen 5'	DGPS-Positionen 5'	Bemerkung
GS5 ^{RTCM} + ALF/RASANT-Decoder NAV486	mittlerer Lagefehler: 5, 24m mittlerer Höhenfehler: 6,45m Ausreißer: Lage < 10m Höhe < 50m	- nur 30% DGPS-Positionen - viele Aussetzter - keine Auswertung	- nicht forsttauglich ! - viele Ausreißer/Aussetzter - geringe Genauigkeit - geringe Zuverlässigkeit
GS50 + ALF/RASANT-Decoder NAV486	mittlerer Lagefehler: 2,40m mittlerer Höhenfehler: 3,50m DGPS+NAV-Positionen 97 % ~ 30 % der 2D-Positionen < 1m ~ 30 % der 1D-Positionen < 1m	mittlere Lagefehler: 1,70m mittlere Höhenfehler: 2,35m DGPS-Positionen zu 72 %	- keine Ausreißer > 20 m - zu 90% Lagefehler 1-5m - zu 80 % Höhenfehler 1-5m
GK12L (interner ALF/RASANT-Decoder)	mittlerer Lagefehler: 2,63m mittlerer Höhenfehler: 3,56m DGPS+NAV-Positionen 86 % ~ 36 % der 2D-Positionen < 1m ~ 20 % der 1D-Positionen < 1m	mittlere Lagefehler: 2,60m mittlere Höhenfehler: 3,59m DGPS-Positionen 86 %	- wenn Position, dann i.d.R. DGPS -> guter Decoder ! - zu 85 % Lagefehler 1-5m - zu 76 % Höhenfehler 1-5m

Tabelle 5-13: Ergebnisse Empfängervergleich 3

2) **GPS/DGPS-Positionsgenauigkeit bei statischer Punkteinmessung unter Verwendung der Empfängersoftware (5', 10', 15'-Intervalle) ? Übereinstimmung der angegebenen Genauigkeitsparameter mit Realität und Zuverlässigkeit des Empfangs von ALF-Korrekturdaten ?**

Die Testmessungen zu diesen Untersuchungen wurden parallel zu den unter 1) beschriebenen Messungen durchgeführt, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist. Für die Positionsbestimmung wurden keine NMEA-Daten verwendet, sondern eine statische Einzelpunktmessung am GS50 durchgeführt (**Beobachtungsraum**). Der Empfänger speichert die bis dahin aus allen Messungen ermittelte Position inkl. diverser Informationen zur Messung (Dauer, Satellitenanzahl, DOP, etc.) und einer Angabe zur Koordinatenqualität (KQ). Über KQ kann der Empfänger auch so programmiert werden, dass bei Erreichen einer bestimmten Schranke (z.B. $KQ-2D < 1\text{m}$) die Messung automatisch gestoppt wird, was im Rahmen der GPS-Inventur im Nationalpark verwendet wurde (s. Kap. 7.4.1). Bei der Auswertung war neben der erreichbaren Lage- und Höhenabweichung sowie der Zuverlässigkeit des verwendeten SAPOS-Decoders vor allem ein Vergleich der aus dem KQ berechneten Lage- und Höhenabweichung mit der realen Abweichung von Interesse, da es sich bei der KQ-Angabe um einen rein statistischen Wert handelt. Er basiert auf der Standardabweichung aus der internen Positionsberechnung (Ausgleichung) sowie einigen zusätzlichen empirischen Annahmen und ist so ausgelegt, dass die im Empfänger berechnete Position mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 66 % max. um den Wert KQ von der wahren Position abweicht [LEICA 2000]. Ob dies zutrifft und inwieweit dieser Parameter auch Rückschlüsse auf die **realen** Lage- und Höhenabweichung zulässt wurde im Rahmen dieser Testmessungen auf den 21 gemessenen Punkten näher betrachtet.



Abbildung 5-10: Aufbau GPS-Messung

	alle Messungen		DGPS		GPS	
Mittel Lageabw. [m]	2,32 ± 0,35		2,28 ± 0,52		2,40 ± 0,29	
Mittel Höhenabw. [m]	4,04 ± 0,66		3,68 ± 0,95		4,66 ± 0,76	
	84 Messungen		64%		36 %	
Häufigkeiten	Lage	Höhe	Lage	Höhe	Lage	Höhe
< 1 m	32 %	29 %	37 %	33 %	23 %	20 %
1 – 5 m	61 %	45 %	54 %	46 %	73 %	43 %
5 – 10 m	5 %	17 %	6 %	15 %	3 %	20 %
> 10 m	2 %	10 %	4 %	6 %	0 %	17 %

Tabelle 5-14: Ergebnisse KQ-Testmessungen

Auf allen Punkten wurde eine 5-, 10- und 15-Minuten Messung direkt hintereinander durchgeführt. Außerdem fand auf acht Punkten eine Wiederholungsmessung an einem anderen Tag statt, so dass insgesamt 84 Messungen in die Auswertung einfließen. Ebenso wie bei der Inventur erfolgte keine optimierte Messplanung durch Berücksichtigung von Satellitensichtbarkeiten. Die Auswertungen ergaben die in Tabelle 5-14 dargestellten Ergebnisse, die folgende Schlussfolgerungen zulassen:

- nur bei 64% der Messungen konnte eine DGPS-Position berechnet werden. Hauptursache ist hierfür wiederum die geringe Empfangsqualität des verwendeten Decoders, denn ein anderes, parallel eingesetztes DGPS-System konnte rund 80% DGPS-Positionen erfassen.
- sehr hohe Grundgenauigkeit ! Mehr als **90 %** der gemessenen Punkte weisen eine **reale** Lageabweichung von **< 5 m** auf (Höhe < 5 m zu ~ 60 %). Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung genauer, dann liefert DGPS eine höhere Anzahl an Lösungen mit hoher Genauigkeit (< 1 m).
- keine wesentliche Genauigkeitssteigerung durch eine längere Beobachtungsdauer (DGPS 15': 50 % < 1m/ DGPS 5': 45 % < 1 m). Empfohlener Mittelwert: 10 Minuten.
- bis auf einen Fall ließen sich alle Ausreißer (> 10m) über die kombinierte Betrachtung von KQ, Satellitenanzahl und GDOP detektieren.

Bei der Auswertung der KQ-Angabe wurde die reale Lageabweichung (dLage) gegenüber dem vom Empfänger berechneten Lage-KQ (2D-Lage) für die beiden Fälle DGPS und GPS aufgetragen (s. Abb. 5-11 u. 5-12). Ist die für ein 2D-Lage-Wert ermittelte Lageabweichung größer, dann kann die berechnete Lage-KQ als zu optimistisch bewertet werden, liegt sie darunter, dann ist sie zu pessimistisch. Die Analyse der

Positionsergebnisse auf den Testpunkten ergab, dass der KQ-Parameter im Fall einer DGPS-Messung eher zu optimistisch ist. Liegt hingegen eine Navigationslösung vor, dann ist der KQ-Wert immer zu pessimistisch. Analysiert man die DGPS-Ergebnisse genauer, dann ergibt sich eine Übereinstimmung von KQ mit einer realen Lageabweichung von $< 2\text{m}$ (rote Markierung) zu 44 % und bei einer Ausdehnung des Genauigkeitsbereiches auf 5m zu knapp 60 %. Verdoppelt man den KQ-Wert, dann stimmt $2 \cdot \text{KQ}$ bei $d\text{Lage} < 2\text{m}$ zu 63 % und $d\text{Lage} < 5\text{m}$ zu 85 %. Diese Werte liegen somit unter den Angaben vom Hersteller. Dabei muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass es sich bei KQ um eine reine Beobachtungsqualität handelt, während in der realen Lageabweichung auch noch Einflüsse wie z.B. Zentrier- und Transformationsgenauigkeit enthalten sein können. Werden diese Einflüsse jedoch wie bei diesen Testmessungen minimiert, dann kann KQ durchaus als *Abschätzung*, aber nicht als *absolute Genauigkeitsangabe* für die Lage- und Höhenabweichung verwendet werden.

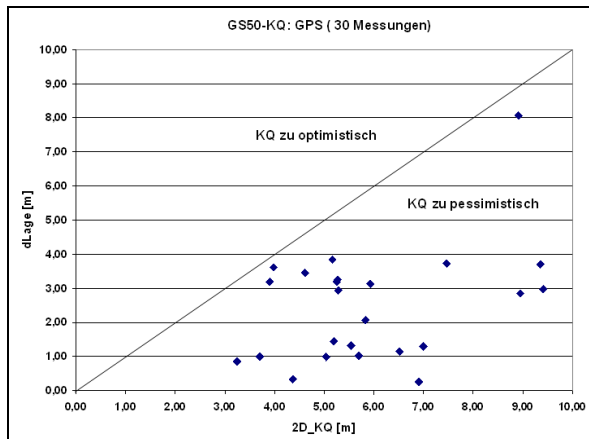


Abbildung 5-11: KQ-Ergebnisse GPS-Lösungen GS50

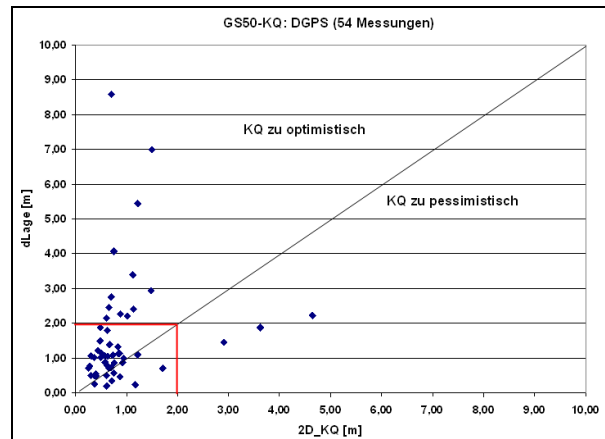


Abbildung 5-12: KQ-Ergebnisse DGPS Lösungen GS50

3) GPS-Positionsgenauigkeit bei statischer Punkteinmessung mit low-cost GPS-Handheld unter Verwendung von NMEA (10'-Intervalle) ? Möglichkeiten und Grenzen der GPS-Navigation ?

Diese Testreihe wurde ebenfalls im Rahmen der Untersuchungen zu 2) durchgeführt. Es bestand technisch leider keine Möglichkeit die Daten online differentiell zu korrigieren. Die Auswertungen ergaben im wesentlichen die selben Genauigkeiten wie unter 1) angegeben. Allerdings kam es bei ein paar Punkten auch zu den für eine absolute GPS-Positionierung typischen Abweichungen von $\sim 10\text{m}$ in der Lage und $\sim 15\text{m}$ in der Höhe.

Neben der statischen Punkteinmessung bietet sich die absolute GPS-Positionierung vor allem für die Navigation im Gelände an. Dabei stellt sich die Frage, welcher Typ von GPS-Empfänger sich am besten für diese Aufgabe eignet. Ist ein (relativ teures) GPS-Rucksacksystem notwendig oder reicht ein GPS-Handheld mit integriertem elektronischem Kompass aus? Um diese Frage zu beantworten, wurden mehrere Punkte mit dem GS50-Rucksacksystem und dem Garmin *etrex summit* bzw. *etrex Vista* aufgesucht. Das Ergebnis fällt überraschend deutlich aus, denn die Garmin Geräte liefern auf Grund ihres integrierten Kompasses auch unter schwierigen Messbedingungen, wenn nicht mehr genügend Satelliten empfangbar sind, eine ausreichend genaue, Richtungsanzeige. Der GS50

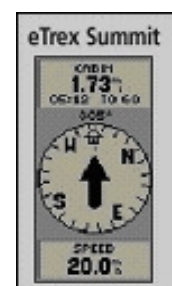


Abbildung 5-13: etrex Display Navigation

ist zwar hinsichtlich der absoluten GPS-Position genauer, aber er reagiert viel empfindlicher auf die schwierigen und vor allem ständig wechselnden Messbedingungen im Wald („Positions-Hüpfen“). Des Weiteren hat das Rucksacksystem eindeutig Nachteile hinsichtlich der Ergonomie (Größe/Gewicht) gegenüber dem GPS-„Handgerät“. Der einzige Nachteil am *etrex summit* ist die recht umständliche Eingabe von Punktinformationen, da er keine Tastatur besitzt. Hierfür empfiehlt sich die Anschaffung eines geeigneten PC-Programmes (z.B. kostenlose Produkte im Internet verfügbar). Dies entfällt bei der komfortablen Eingabe über die GS50-Tastatur oder direktem Datentransfer über PC in die Geo-Datenbank des Empfängers. Bei 30 mit den GPS-Handheldgeräten angegangenen Punkte ergab die Navigation einen Restfehler von $< 5\text{m}$, bei zwei Punkten von unter 10m , so dass anschließend der Punkt durch visuelle Merkmale (Baumplot, Markierungen) gefunden werden konnte.

4) Vergleich der Positionsgenauigkeit und Zuverlässigkeit bei Nutzung von ALF (Langwelle)- oder HEPS (GSM)- Korrekturdaten (15'-Intervalle) ?

Beim Fehlerbudget von DGPS kann die Wahl des verwendeten Korrekturdatendienstes und damit der verwendeten Referenzstation und Übertragungstechnik eine große Rolle spielen. Ursache hierfür sind bestimmte Einflüsse, die z. B. aus der Entfernung der Referenzstation, des angebotenen Korrekturdatentyps oder des Korrekturdatenalters resultieren. Deshalb wurde mit einem Vergleich zwischen der SAPOS-Station in Finsterau (Übertragungstechnik: GSM, Entfernung: ~ 10 km) und der bisher verwendeten Station des ALF-Positionierungsdienstes (Übertragungstechnik: Langwelle, Entfernung: 350 km) begonnen. Bei den Messungen wurden zwei baugleiche GPS-Sensoren (Leica SR 530) mittels eines Antennensplitters an die gleiche GPS-Antenne (AT202) angeschlossen, so dass beide Empfänger die identischen GPS-Signale empfangen. Unterschiede in den Ergebnissen konnten somit nur aus den unterschiedlichen Korrekturdatenverfahren resultieren. Die bisherigen Ergebnisse zeigen dabei keine eindeutige Genauigkeitssteigerung bei Verwendung des selben Korrekturdatentyps (Code-Pseudorangekorrekturen). Allerdings ist der Einfluss des Datenalters bei Daten via GSM geringer (= stabiler = zuverlässiger) und es besteht bei Verwendung von GSM die Möglichkeit einen anderen Korrekturdatentyp (Phasen-Pseudorangekorrekturen) zu verwenden. Vor allem Letzteres ergab in Verbindung mit dem neuen SAPOS-Konzept der „Virtuelle Referenzstationen“ (VR) eine höhere Genauigkeit (Lage: ~ 1m, Höhe: ~ 2,5 m). Bei diesem Konzept wählt sich der Anwender auf einem Zentralrechner der Bayerischen Landesvermessung in München ein, dabei wird automatisch seine ungefähre Position (~ 100 m) mitgeteilt. Anschließend berechnet der Zentralrechner mit Hilfe der ihm bekannten Daten der nächstgelegenen Referenzstationen eine virtuelle Referenzstation in unmittelbarer Nähe des Anwenders (wenige Meter) und teilt ihm sowohl die Koordinaten der VR als auch die darauf bezogenen Korrekturdaten mit. Die höhere Genauigkeit resultiert aus der geringen Entfernung zu der VR (entfernungsabhängige DGPS-Fehler werden minimiert) und der Minimierung von atmosphärischen Fehlern bei Verwendung mehrerer Referenzstationen (bei Berechnung der VR). Dieses Konzept wurde im Jahr 2002 für alle SAPOS-Stationen in Bayern realisiert, so dass die begonnene Untersuchung im Jahr 2002 mit dem gleichen Geräteaufbau fortgesetzt wurde. Diesmal war ein direkter Vergleich der Positionsgenauigkeit und Zuverlässigkeit bei Nutzung von ALF (Langwelle)- oder SAPOS-HEPS (GSM) – Korrekturdaten. Gegenstand der Untersuchungen, wobei auch die Verfügbarkeit (Empfang) von großer Bedeutung war. Da HEPS-Daten Korrekturen für einen PDGPS-Dienst darstellen, war auch mit einer höheren Genauigkeit in den Positionsergebnissen zu rechnen. Alle Messungen fanden auf koordinatenmäßig bekannten Punkten im gesamten Nationalparkgebiet statt. Insgesamt wurden 15 Punkte an verschiedenen Tagen in 15'-Intervallen beobachtet. Die folgende Tabelle 5-15 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der mit KONMEA (s. Kap. 5.3.1) ausgewerteten NMEA-Daten.

SR530 ALF						SR530 GSM					
alle Positionen			DGPS			alle Positionen			DGPS		
dL	dH	Anzahl	dL	dH	Anzahl	dL	dH	Anzahl	dL	dH	Anzahl
4,51 m	6,54 m	89 %	3,36 m	4,10 m	26%	2,53 m	3,99 m	97 %	1,89 m	2,91 m	83 %

Tabelle 5-15: Ergebnisse unterschiedlicher DGPS-Korrekturdaten

Bei der Beurteilung der Testmessungen muss noch hinzugefügt werden, dass die verwendete GSM-Hardware ausreichend feldtauglich sein muss (Energieversorgung, Kälte, Nässe etc.). Hierfür gibt es aber geeignete Hardwarelösungen (z.B. GSM-Modul mit Energieversorgung und Steuerung über GPS-Sensor). Außerdem sollten bei einer abschließenden Beurteilung auch die Betriebskosten von GSM mit einfließen, die bei einem Decoder nicht anfallen. Dafür können hier die Anschaffungskosten höher ausfallen. Da sich die Tarife der Mobilfunkanbieter permanent ändern, wurde auf einen Vergleich an dieser Stelle verzichtet. Zusammenfassend können folgende Feststellungen getroffen werden:

- ☞ GSM (VR) genauer als ALF bei selben Korrekturdatentyp
- ☞ GSM weist eine höhere Zuverlässigkeit auf (Anzahl gültiger Positionen)
- ☞ Verfügbarkeit (Empfang) von GSM ist vergleichbar mit Langwelle.

5.3. Diskussion optimierter Auswertestrategien im Positionsraum

Wie bereits im Kapitel 5.1.2 ausführlich erläutert, nutzen viele der derzeit auf dem Markt angebotenen Softwarepakete für mobile GIS eine NMEA-Datenschnittstelle für die Verbindung zu einem GPS-Empfänger. Diese Lösung bietet bei Nutzung der drei NMEA-Standarddatensätze GGA, GSV und GSA (und nicht firmenspezifischer NMEA-Datenformate) zwar ein hohes Maß an Flexibilität in der Empfängerwahl, stellt für die Bewertung der satellitengestützten Position aber nur eine begrenzte Anzahl an Informationen zur Verfügung (s. Abb. 5-3). In der Praxis werden häufig nur die Parameter des GGA-Datensatzes genutzt. Dabei hat sich gezeigt, dass die darin enthaltenen Informationen für eine einfache, schnelle und zuverlässige Beurteilung der Positionsqualität oft nicht ausreichen [CZAJA 2001b]. Daher sind neue Ansätze für die Qualitätsaussage von Messergebnissen im Positionsraum zu finden. Die nachfolgende Diskussion optimierter Auswertestrategien auf Basis der o.g. Datensätze soll hierzu einen Beitrag liefern. Die Nutzung des codebasierten DGPS-Verfahrens im Forst (s. Kap. 5.2) unter Einsatz qualitativ geeigneter Empfängertechnologie wirkt sich hierbei wie folgt auf die oben diskutierten Einflussfaktoren einer GPS-Messungen aus und gibt den Fokus der hier durchgeführten Untersuchungen vor:

☞ Messparameter/-verfahren

Typ Messverfahren: relativ (DGPS) ✓

Messmodus: statisch ✓

Beobachtungsgröße: phasengeglätteter Code ✓

Beobachtungsdauer: < 15 min (s. Kap. 5.2) ✓

Auswertzeitpunkt: Echtzeit ✓

Länge der Basislinie: DGPS-Dienst ALF (350 km), 1-3 m zu erwartende Genauigkeit ✓

Einfluss Alter Korrekturdaten?

☞ Atmosphäre

Iono- / Troposphäre: Minimierung / Eliminierung durch relatives GPS ✓

☞ Satellit

Bahn- / Uhrenfehler: Minimierung / Elimination durch relatives GPS ✓

☞ Signal / Sensorik

Anzahl Frequenzen: Ein-Frequenz-Empfänger (L_1) ✓

Antennenphasenzentrum: nicht relevant in diesem Genauigkeitsbereich ✓

Empfängerrauschen: von verwendeter Hardware abhängig. ***Auffälligkeiten SNR ?***

Mehrweg, Beugung, Streuung: zeit- und ortsabhängig, ***Einfluss und Größenordnung ?***

☞ Geometrie

Satellitenanzahl: ***Grundregel („je mehr, desto besser“) gültig ? Typische Satanzahl im Forst ?***

Satellitengeometrie: DOP-Faktoren, ***Bewertungsmöglichkeiten durch fehlenden GDOP ?***

5.3.1. Analysesoftware KONMEA

Alle in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen wurden mit Hilfe von *KONMEA* (*Konvertierung und Auswertung von NMEA-Daten*) durchgeführt, einer speziell für die Auswertung von NMEA-0183 Daten im Rahmen dieser Arbeit auf der Basis von *Matlab* entwickelten Analysesoftware. Die Programmstruktur ist bewusst einfach gehalten und soll nachfolgend kurz beschrieben werden. Die Funktionen des Hauptmenüs sind (s. Abb. 5-14):

- *Import*

Stellt die Startfunktion der Software dar, da erst nach dem Import der Daten die anderen Funktionen freigeschaltet sind. Es können Datensätze vom Typ GGA, GGA/ PGRMZ oder GGA/GSV/ GSA eingelesen werden. Dabei ist eine Anten-

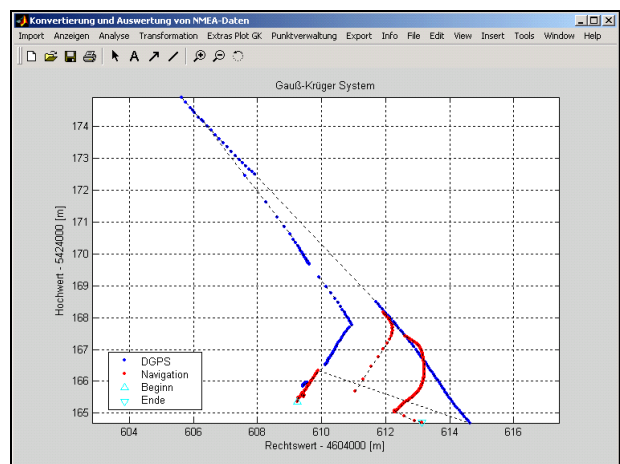


Abbildung 5-14: Hauptfenster KONMEA

nenhöhe für eine direkte Reduktion der gemessenen Höhe auf den Bodenpunkt und die Messfrequenz anzugeben. Letzteres dient zur Kontrolle der eingelesenen Datensätze, da in einer oder auch mehreren Epochen mindestens einer der Datensatztypen komplett fehlen kann oder vom GPS-Empfänger in nicht konstanten Zeitabständen generiert wird. Diese Inkonsistenzen werden beim Einlesen automatisch korrigiert und dabei die Datensätze auch auf ihren korrekten Aufbau hin überprüft (vollständige Anzahl an Datenfelder). Nach Abschluss des Datenimports werden sowohl die Anzahl an Datensätzen als auch die Ergebnisse der Überprüfung am Bildschirm angezeigt (s. Abb. 5-15).

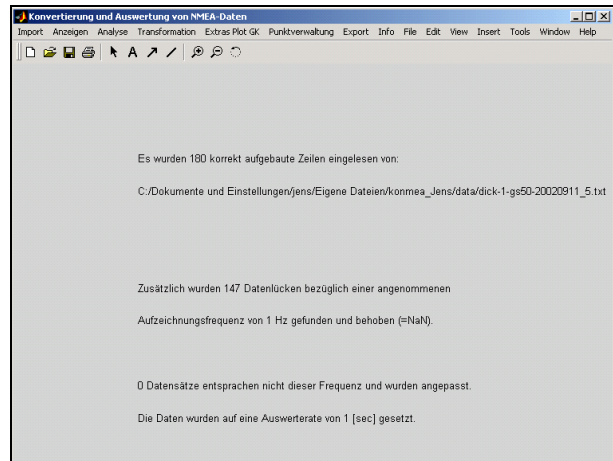


Abbildung 5-15: Ergebnisse Datenimport KONMEA

- *Anzeigen*

Dieses Menü ermöglicht die Anzeige diverser Standardparameter (WGS84-Position in Lage und Höhe, HDOP, Satellitenanzahl, Meßmodus GPS/DGPS) und ein paar spezielle Abfragen mit Informationen über das gesamte Datenintervall (z. B. Beobachtungsdauer, Anzahl der Registrierung, Mittelwert inkl. Standardabweichung aller GPS-/DGPS-Positionen), über das längste Intervall zusammenhängender Epochen sowie über Ergebnisse aus Vergleichsberechnungen mit einem bekannten Sollpunkt. Letzteres erlaubt die Bestimmung der Lage- und Höhenabweichungen oder die Berechnung von Fehlermaßen wie z. B. empirische Standardabweichung, Circular Error Probable (CEP) oder dem mittleren Punktfehler nach Helmert.

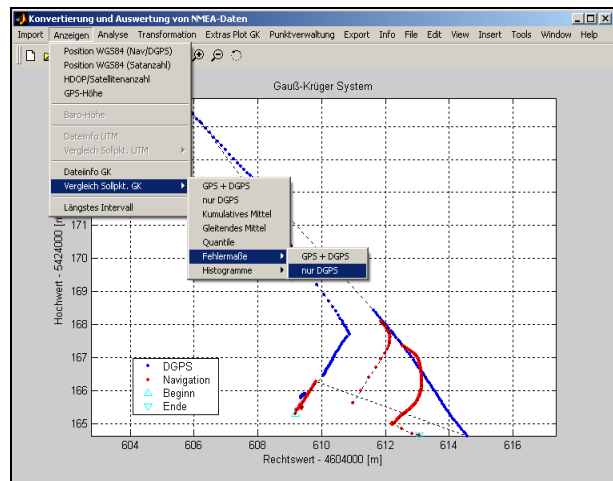


Abbildung 5-16: KONMEA-Menü *Anzeige*

- *Analyse*

Beinhaltet verschiedene, neue Ansätze von Analysefunktionen für eine optimierte Auswertung von Daten aus dem Positionsraum, die in den nachfolgenden Kapiteln detaillierter beschrieben und deren Ergebnisse darin präsentiert werden.

- *Transformation*

Die importierten Positionsdaten können entweder in das *UTM (WGS84)*-System umprojiziert oder auch in ein *topozentrisches* bzw. mittels einer 7-Parameter-Helmerttransformation in ein *Gauß-Krüger*-System transformiert werden. Die hierfür notwendigen Parameter werden über Eingabemasken abgefragt und in Konfigurationsdateien vorgehalten. Die anschliessend in KONMEA ausgeführten Funktionen nutzen dann die Positionen in dem aktuell gewählten Bezugssystem, wobei nicht alle Programmfunktionen für alle Bezugssysteme zur Verfügung stehen.

- *Punktverwaltung*

Erlaubt das Einlesen einer Punktliste oder die manuelle Eingabe von (Referenz-)Punkten mit *Nummer*, *x*- und *y*-*Koordinaten* und *Höhe* sowie deren graphischgestützte Verwaltung.

- *Export*

Ausgabe der NMEA-Positionsdaten in eine formatierte ASCII-Datei unter Berücksichtigung eines der von KONMEA unterstützten Bezugssysteme WGS84, GK, UTM oder topozentrisches System.

- *Extras Plot GK*

Nach einer Gauß-Krüger-Transformation stehen in diesem Menü die in der Abbildung 5-17 dargestellten Funktionen zur Verfügung. In Verbindung mit der visualisierten Positionspur bieten sie verschiedene *grafischgestützte Hilfsmittel* an, um die Positionsergebnisse besser beurteilen zu können. Diese reichen von der Anzeige eines Sollpunktes mit oder ohne einem Positionskreis (= radialer Abstand zum Sollpunkt oder zu dem Schwerpunkt der Positionen (Abb. 5-17)), über die Messung von Entfernung und Azimut zwischen zwei Punkten oder die Einfärbung der Einzelpositionen in Abhängigkeit von der Satellitenanzahl (s. Abb. 5-18) bis zu einer Abfrage spezieller Punktinformationen oder einem sog. Cluster-Filter. Die beiden letztgenannten Funktionen gehören zu den in dieser Arbeit untersuchten neuen Ansätzen für eine verbesserte Bewertung von Positionsraumdaten und werden ausführlich in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 erläutert.

Diese Auflistung zeigt, dass KONMEA neben den neuen Analysefunktionen auch viele Standardparameter bzw. -funktionen zur Beurteilung der Positionsqualität beinhaltet, die bereits heute in vielen (D)GPS-Programmen oder Softwaremodulen für mobile GIS integriert sind. Hierzu zählen vor allem die Funktionen des Menüs *Anzeige* und der *Positionskreis zum Schwerpunkt*. KONMEA ermöglicht dadurch effizient vergleichende Untersuchungen

5.3.2. DGPS-Korrekturdaten

Der Einfluss von DGPS-Korrekturdaten auf die Qualität einer satellitengestützten Position wurde bereits in Kap. 5.2 beschrieben. An dieser Stelle soll daher nochmal explizit auf die qualitätsbestimmenden Eigenschaften der Korrekturdaten und deren Auswirkungen auf die resultierende Position eingegangen werden.

Neben der Entfernung zur Referenzstation (s. Kap. 5.1.3) hat bei der Verwendung von DGPS in Echtzeit auch das Alter der übertragenen Korrekturen einen Einfluss auf die Positionsqualität. Da sich auf Grund der Satellitenbewegung der Fehler bzgl. der Pseudoentfernungen und den daraus abgeleiteten *Pseudo Range Corrections (PRC)* ändert, gelten die PRC streng genommen nur für den Zeitpunkt der Messungen. Die Berechnung der Korrekturwerte und deren Übermittlung an den Nutzer benötigt jedoch eine gewisse Zeit, so dass sie zum Zeitpunkt der Verarbeitung auf dem Rover „veraltet“ sind. Außerdem muss der mobile Empfänger so lange mit den Korrekturwerten rechnen, bis neue Werte übermittelt werden. Je nach Datenübertragungsmedium kann es sich hier um mehrere Sekunden handeln [WEISS 2000].

Je schneller sich die Korrekturwerte ändern und je größer die angestrebte Genauigkeit ist, desto höher sind die Anforderungen an die Berechnung und Bereitstellung der Daten beim Nutzer (Aufdatierungsrate). Die Anforderungen können reduziert werden, wenn zusätzlich zu den Korrekturen Angaben über ihre zeitliche Veränderung gemacht werden. Da sich die Atmosphäre oder die Uhrenfehler nicht sprunghaft ändern, lassen sich die Korrekturwerte über einen gewissen Zeitraum als lineare Funktion modellieren [BAUER 1997]. Die Länge hängt von den jeweiligen Genauigkeitsanforderungen ab. Bei der Bereitstellung von DGPS-Korrekturdaten im RTCM-Format werden daher auch *Range Rate Corrections (RRC)* übertragen (RTCM Message Typ 1), wodurch sich der beschriebene Einfluss minimieren lässt. Bei DGPS ergeben sich somit die am Rover zum Messzeitpunkt t korrigierten Code-Pseudorange zu

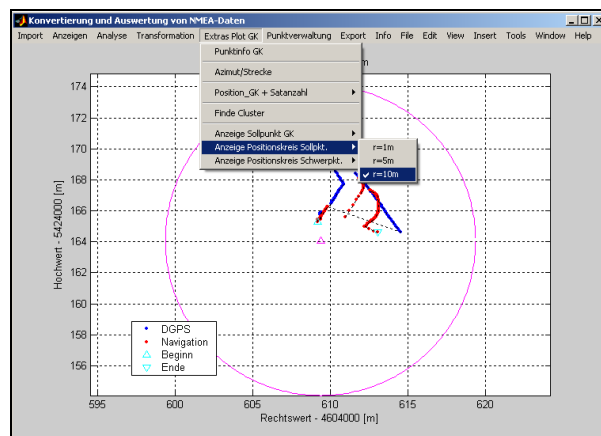


Abbildung 5-17: KONMEA-Menü *Extra Plot GK*

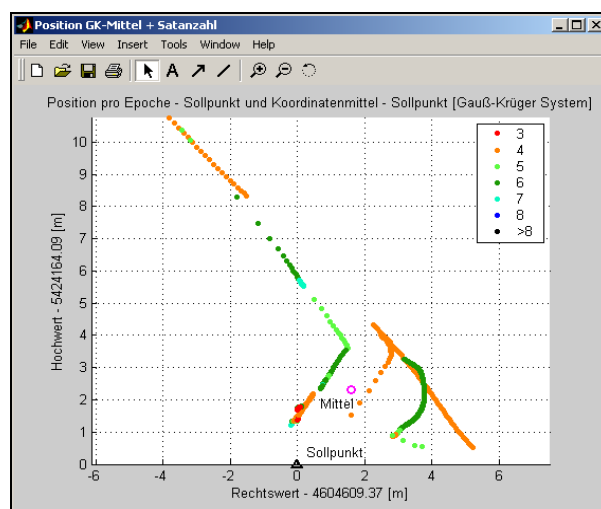


Abbildung 5-18: Positionsspur mit Satellitenanzahl

$$\hat{C}_{Rov}^i(t) = C_{Rov}^i(t) + \Delta C_{Rov}^i(t) = C_{Rov}^i(t) + [\Delta C_{Ref}^i(t_0) + RRC^i \cdot (t - t_0)] \quad (Gl. 5-4)$$

mit C_a^i = Codemessung zwischen Empfänger a und Satellite i

RRC^i = wahre geometrische Distanz aus Satelliten- u. Empfängerkoordinaten

ΔC_a^i = Code-Pseudorange-Korrektur am Empfänger a zum Satelliten i

t, t_0 = Zeitpunkt der Messung am Rover, Zeitpunkt der Messung an Referenz

Im umgekehrten Fall kann es vorkommen, dass auf der Referenzstation schon die neusten Satellitenbahn-daten vorliegen und zur Berechnung der DGPS-Korrekturen genutzt werden, während sie auf dem Rover noch nicht dekodiert werden konnten. In diesem Fall lassen sich die Code-Pseudoranges des Rovers mit Hilfe der im RTCM Nachrichtentyp 2 enthaltenen *Delta Differential GPS Korrekturen* über die Gleichung 5-4 korregieren, die sich auf die „alten“ Bahn-daten beziehen. Voraussetzung hierfür ist, dass die verwendeten DGPS-Daten diesen Nachrichtentyp anbieten und der GPS-Empfänger sie verarbeiten kann.

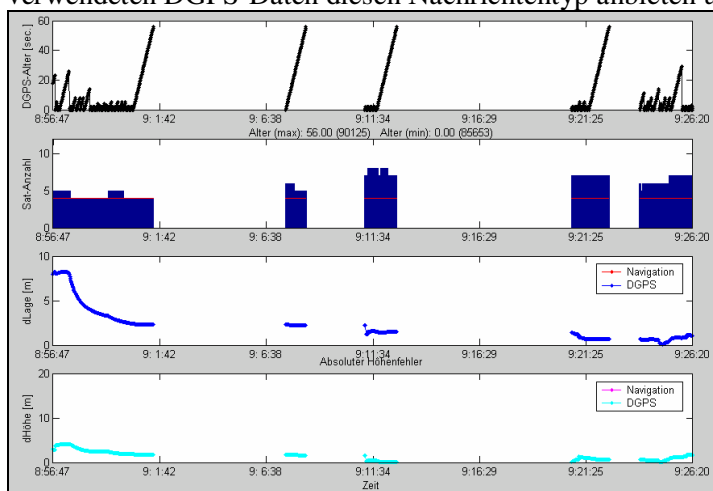


Abbildung 5-19: Hohes DGPS-Korrekturdatenalter

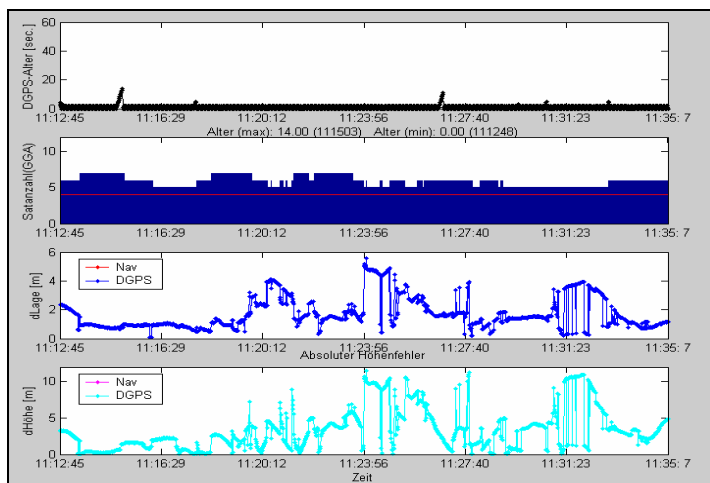


Abbildung 5-20: Typisches DGPS-Korrekturdatenalter

Eine Analyse des Alters von DGPS-Korrekturen mit Daten aus den in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Testmessungen ergab bei der Nutzung von SAPOS-ALF / RA-SANT-Korrekturdaten (spezifizierte Aufdatierungsrate von 3-5 s, RTCM-Nachrichtentypen 1 u. 2) keinen signifikanten Einfluss auf die Lage- oder Höhengenaugkeit der gemessenen Punkte, obwohl die Daten ein Alter von bis zu 56 s aufweisen konnten. Die Abbildung 5-19 zeigt hierzu ein Beispiel mit dem GPS-Empfänger GS50 und dem DGPS Decoder NAV486, bei dem auch deutlich die Positionslücken auf Grund fehlender Satellitensignale zu erkennen sind. In der Regel lag das Korrekturdatenalter bei <20 s (s. Abb. 5-20), so dass man davon ausgehen kann, dass in der Genauigkeitsklasse von 1-5 m die verfügbaren Korrekturdatentypen ausreichen. Bei höheren Ansprüchen an die Genauigkeit sind Korrekturdatendienste und Übertragungsmedien zu wählen, die eine höhere Aufdatierungsrate ermöglichen. Untersuchungen mit dem SAPOS-HEPS-Dienst über GSM-Mobilfunk (Aufdatierungsrate von 1 s, Nachrichtentypen 1,2, 18 und 19) im Bayersichen Wald ergaben ein maximales Korrekturdatenalter von 10 s. Die mit diesen beiden DGPS-Diensten erreichbaren Genauigkeiten können der Tabelle 5-15 auf der Seite 88 entnommen werden.

Weitere Parameter zur Beurteilung der Qualität von DGPS-Korrekturdaten stehen bei der Nutzung von NMEA-Standarddatensätzen nicht zur Verfügung. Der Vollständigkeit halber sei aber darauf hingewiesen, dass grundsätzlich die Möglichkeit einer Filterung besteht, die nur differentiell korrigierte Positionen zu einer Lösung zulässt. Eine solcher *DGPS-Filter* ist in vielen (D)GPS-Programmen oder Softwaremodulen für mobile GIS integriert. Bei den in Kap. 5.2.3 beschriebenen Auswertungen hat sich aber gezeigt, dass häufig keine ausreichende Anzahl an DGPS-Positionen für eine zuverlässige Bewertung bei sehr streuenden DGPS-Positionen zur Verfügung steht. In diesen Fällen ist es eventuell sinnvoll, „gute“ GPS-Positionen in die Lösung miteinzubeziehen. Daher wird ein Ansatz für einen solchen *DGPS-GPS-Filter* in Kap. 5.3.5 vorgestellt.

5.3.3. Signalspezifische Fehler

Neben den atmosphärischen Einflüssen kann ein Satellitensignal zusätzlich noch durch *Abschattungen* oder *Reflexionen* an Objekten gestört werden. Unter der Abschattung ist dabei nicht nur der allgemein erwartete Effekt einer kompletten Signalunterbrechung, sondern auch Signalverzerrungen durch Beugung oder Streuung an Objekten zu verstehen [WIESER 2002]. Diese Effekte bewirken, dass die Antenne bei einer Unterbrechung der direkten Verbindung Satellit-Empfänger noch Signale von dem „abgeschatteten“ Satelliten empfängt und die Positionslösung negativ beeinflussen. So weisen z.B. verzerrte Phasenmessungen auf Grund von Beugungseffekten zusätzliche elektrische Weglängen gegenüber direkten Signalen auf [HARTINGER et al. 1999]. Ähnliche Auswirkungen haben Mehrwegeeffekte (*Multipath*), bei denen nicht nur das Satellitensignal direkt die Antenne erreicht, sondern auch an der Empfangsumgebung reflektiert wird. Die Signalamplitude sowie die Messung des Codes und der Trägermischphase werden hierdurch verfälscht. Die Größe des Einflusses ergibt sich durch die Reflexionseigenschaften in der Empfängerumgebung, wobei die Auswirkungen bei Code-Messungen meist im Dezi-, bei Phasenmessungen im Zenti- oder Millimeterbereich liegen [KLEUSBERG, TEUNISSEN 1996], [PARKINSON, SPILKER 1996].

Signalstörungen sind bei der satellitengestützten Positionierung im Forst von großer Bedeutung, da der Wald im Gegensatz zu künstlichen Bauwerken ein diffuses Hindernis für GPS-Signale darstellt und scheinbar wie ein stark strukturierter Reflektor wirkt. Weder Position noch Oberflächenbeschaffenheit des Reflektors (Stämme, Äste, Blätter, Feuchtigkeit) sind konstant, sondern unterliegen beide langperiodischen (Jahreszeiten) und schnell veränderlichen (Regen, Winde) Variationen. Eine rein modellbasierte Minimierung oder Elimination der Einflüsse scheidet daher aus, so dass nur eine verbesserte Verarbeitung oder Beurteilung der gemessenen Signale zielführend ist. Die Schwierigkeit liegt nun darin, unter diesen Messbedingungen noch messbare „korrekte“ von eventuell „gestörten“ GPS-Signalen zu unterscheiden. Daher wurden sowohl auf wissenschaftlicher Seite als auch auf Herstellerebene in den letzten Jahren sehr viele Anstrengungen unternommen, um diese Störeinflüsse durch neue Hardwarekomponenten (z. B. modifizierte Antennen- oder GPS-Prozessor-Designs), erweiterte Signalmodelle (z. B. Multipath Virtual Laboratory der ESA) oder optimierten Datenanalysetechniken (s. Auflistung unten) zu reduzieren. Für weitere Detailinformationen sei an dieser Stelle auf [STEWART 2003] verwiesen, der die gängigen Datenanalysetechniken in die folgenden drei Gruppen unterteilt:

1. Untersuchung von Signaleigenschaften bei sich wiederholender Satellitengeometrie.
2. Anwendung von diversen, mathematischen Filtertechniken (z. B. adaptive oder Wavelet-Filter).
3. Gewichtung der Beobachtungen anhand von Signaleigenschaften.

Bei allen drei Techniken liegt der Fokus auf der Analyse von Daten aus dem Beobachtungsraum. Geht man auf den Positionsraum über, dann stellt sich die Frage, welche der nutzbaren Parameter Rückschlüsse auf eine eventuell vorhandene Signalstörung und in weiterer Folge auf das endgültige Positionsergebnis zulassen? Nach [WIESER 2002] stellen die *Elevation*, das *Signal-to-Noise-Ratio (SNR)* oder die *Residuals* der Beobachtungen geeignete Indikatoren für die Signalqualität dar. Berücksichtigt man nun die Vorgabe der alleinigen Nutzung der NMEA-Standarddatensätze GGA, GSV und GSA, dann stehen für eine Beurteilung der Positionsqualität das *Azimuth*, die *Elevation* und das *SNR* von jedem, in dieser Epoche verwendeten Satelliten zur Verfügung, wobei nur das SNR eine direkte Signaleigenschaft darstellt.

Wie in [BUTSCH, KIPKA 2004] oder [LANGLEY 1997] ausführlich beschrieben, ist der Messfehler bei der GPS-Entfernungsmessung mit Radiosignalen umso kleiner, je stärker das empfangene Signal und je schwächer das bei der Messung unvermeidbare thermische Rauschen ist. Hierbei stammt der größte Teil der im Empfänger auftretenden thermischen Rauschleistung N (engl. Noise) von der Wärmestrahlung im relevanten Frequenzbereich, die von Objekten in der Umgebung ausgeht und von der GPS-Antenne auf Grund ihrer bis zu flachen Elevationswinkeln reichenden Antennencharakteristik erfasst wird. Ein weiterer Teil der Rauschleistung entsteht im Empfänger selbst. Das Verhältnis zwischen der Leistung C des Trägersignals an der Antenne und dem vorhandenen (nomierten) Rauschen, kurz C/N_0 (*carrier-to-noise-power-density ratio*), wird im GPS-Empfänger gemessen und von vielen Produkten ausgegeben. Der Wert C/N_0 gibt an, um wie viele dB-Hz das gemessene GPS-Signal über dem absoluten Rauschpegel liegt. Er ist eine Funktion der verwendeten Empfänger-Antennen Kombination und der Signalqualität, die durch atmosphärische Ausbreitungseffekte, Mehrwegeeffekte und Signalverzerrungen verschlechtert wird. Beispiele hierzu finden sich in [AXELRAD et al. 1994], [BRUNNER et al. 2000] oder [BUTSCH 2001].

An dieser Stelle sei aber auch darauf hingewiesen, dass die Angabe des SNR nicht auf Basis allgemeingültiger Standards erfolgt, so dass die Definition, der Wertebereich und die Aussagekraft zwischen Empfängern verschiedener Hersteller variieren kann. Einen aufschlussreichen Beitrag hierzu und zu der Tatsache, dass das SNR auch vom Typ des Satelliten abhängt findet man in [COLLINS, STEWART 2000]. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Empfänger (s. Kap. 5.2.3) geben im GSV-Datensatz ein SNR aus, das die in Tabelle 5-16 dargestellten (konfigurationsabhängigen) Werte annehmen kann und die nach [GIANNIOU 1996] die folgende Aussagekraft besitzen:

A. Elevation:

Das Signal-Rausch-Verhältnis wird von der Elevation des Satelliten beeinflusst. Je flacher das Signal die Atmosphäre durchläuft, umso stärker wird es gedämpft und verrauscht. Daher sinkt bei abnehmender Elevation das SNR (s. Abb. 5-22).

B. Messgenauigkeit:

SNR als Indikator für die Genauigkeit der Beobachtungsgröße Code oder Phase.

C. Signalstörungen:

Detektion L₁/L₂-spezifischer Störungen

Da im Positionsraum keine Beobachtungen vorliegen, muß auf die Bewertungsmöglichkeiten B und C ebenso verzichtet werden, wie auf die oben erläuterte Gruppe 1 der Analysetechniken, da sich die Satellitengeometrie auf Grund der veränderlichen Umgebungsbedingungen nie exakt wiederholt und ein nochmaliges Angehen nicht praxistauglich ist. Bleiben nur die Methoden der Gruppe 2 und 3. Vor allem die in Gruppe 3 behandelten Gewichtsfunktionen bieten hier interessante Ansätze. So wird z. B. auf Basis des sigma-ε-Modells [HARTINGER, BRUNNER 1999], das die gemessenen SNR zur Berechnung der Varianzmatrix für die Doppeldifferenzen von Phasenbeobachtungen verwendet, von [BRUNNER et al. 1999] in dem sigma-Δ-Modell zur Trennung zwischen der tatsächlichen Signalqualität und der Empfänger- bzw. Antennencharakteristik ein spezielles Antennentemplate vorgeschlagen. Dieses Template ist definiert als der maximale C/N₀ Wert, den ein Signal bei einer gewissen Elevation für eine spezifische Empfänger-Antennenkombination haben kann, und wird aus einer 24h-Messung mit exakt dieser Hardware gewonnen. Verzerrte und durch Mehrwegeeffekte überlagerte Signale weisen bei gleicher Elevation niedrigere C/N₀ Werte als unbeeinflusste Satellitensignale auf. Je nach Unterschied (Δ) zwischen dem erwarteten Templatewert und dem gemessenen C/N₀-Wert wird die Beobachtung abgewichtet (s. Abb. 5-23), wobei auch ein automatisch kalibrierendes SNR-Gewichtsmodell, das unabhängig von der gewählten Hardware und den Umgebungsbedingungen arbeitet, möglich ist [RICHTER, EULER 2001]. Überträgt man diesen Ansatz auf den Positionsraum, dann ist zu klären, ob sich die über ein Template abgeleitete Differenz im SNR auch als Bewertungskriterium für die Beurteilung der Position eignet.

Empfänger	SNR Min.	SNR Max.
Leica SR530	28 (Max. Empfang)	51
GS 50	32 (Max. Genauigkeit)	51
GK12L	22	51

Tabelle 5-16: SNR-Wertebereiche

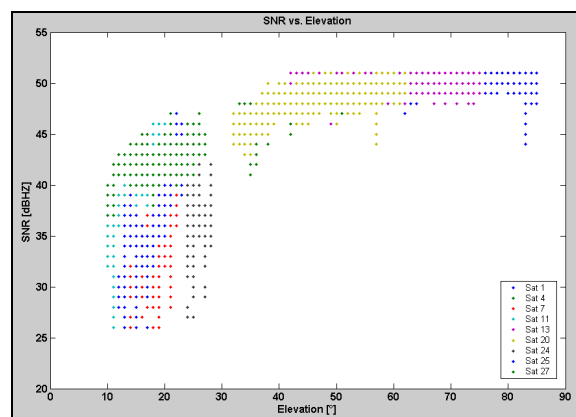


Abbildung 5-21: SNR/Elevation Abschätzung < 25°

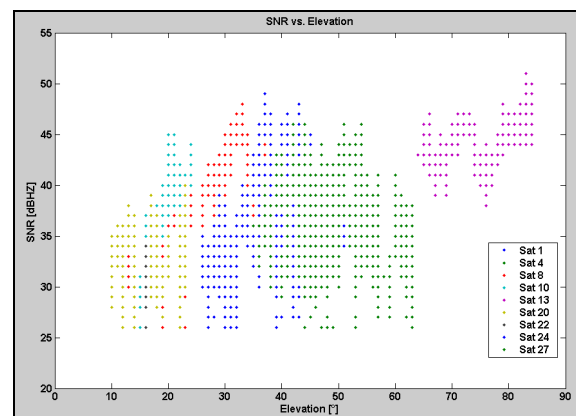


Abbildung 5-22: SNR/Elevation im Stangenholz

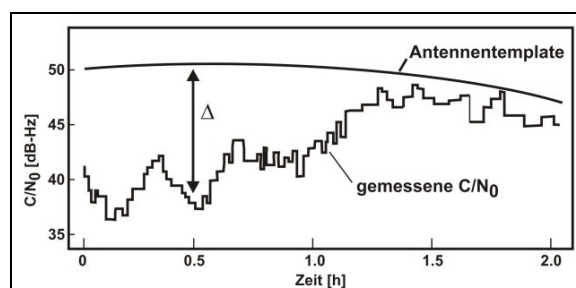


Abbildung 5-23: SIGMA-Δ-Gewichtsmodell

Eine im ersten Schritt durchgeführte Analyse der NMEA-Daten aus den Testmessungen ergab allerdings keine Korrelationen zwischen einer Lage- und Höhenabweichung der Position und den SNR-Werten einer Messepoche. Die Abbildung 5-25 zeigt hierzu ein Beispiel aus einem Stangenholz, bei dem alle SNR-Werte (links), das gemittelte SNR (rechts) oder das SNR einzelner, vom Anwender frei wählbarer Satelliten (Mitte) dargestellt werden. Zudem stellte sich heraus, dass bei ca. 10% der Messungen, unabhängig vom Empfängertyp die hierzu notwendigen GSV-Datensätze unvollständig ausgegeben wurden und Lücken in den SNR-Daten vorlagen. Dies kann beispielsweise durch einen Vergleich der aus dem GGA bzw. GSV-Datensatz ausgelesenen Satellitenanzahl oder anhand der Überprüfung der Sollanzahl an SNR-Datensätzen verdeutlicht werden (s. Abb. 5-24 links / rechts). Eine zuverlässige Bewertung der Positionsqualität über das SNR ist durch diese Inkonsistenzen in den NMEA-Daten nicht möglich.

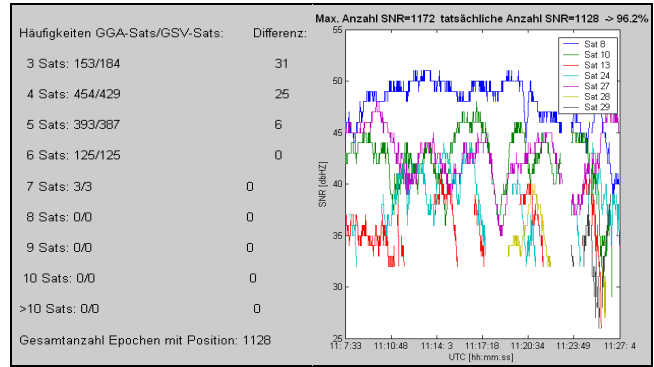


Abbildung 5-24: Überprüfung von NMEA-Datensätzen

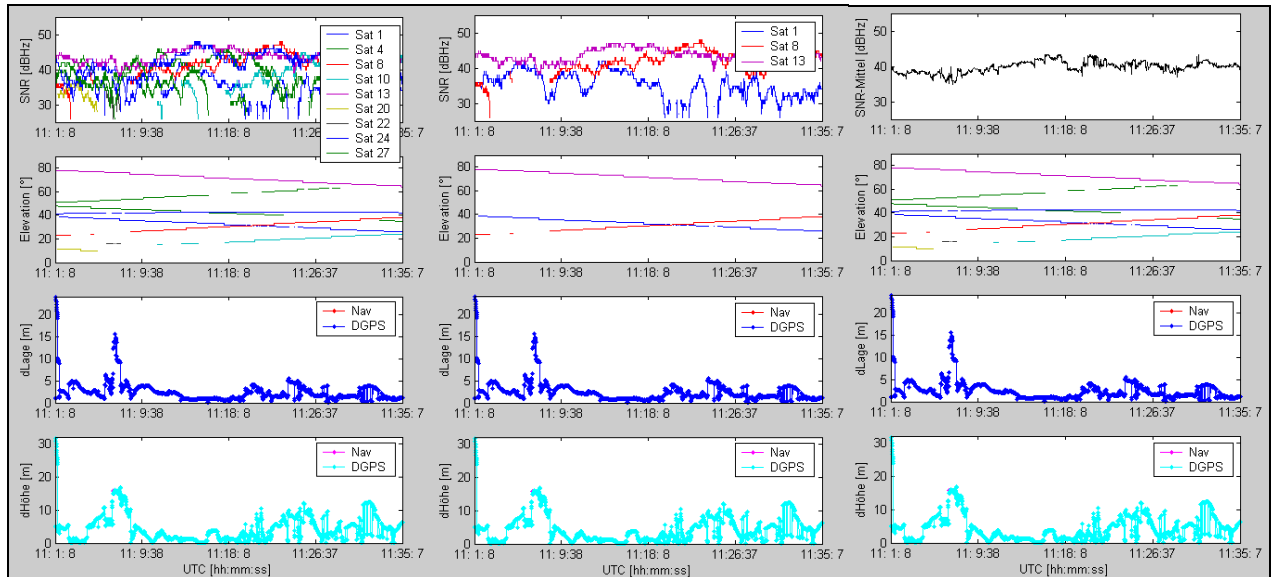


Abbildung 5-25: SNR und Elevation vs. Lage- und Höhenabweichung im Stangenholz

5.3.4. Geometrische Fehler

Unter den geometrischen Fehlern sind diejenigen Einflüsse auf die Positionsqualität zu verstehen, die aus der zu einer Messepoche vorliegenden Satellitenanzahl sowie deren Konstellation im Raum resultieren.

☞ Satellitenanzahl:

Die allgemeine Grundregel „je mehr Satelliten sichtbar, desto höher die Qualität der berechneten Position“ gilt grundsätzlich auch beim Einsatz der Satellitennavigation in forstlicher Umgebung. Allerdings muss das nicht immer so sein, wie das Beispiel in der Abbildung 5-26 verdeutlicht. In diesem Fall weisen diejenigen Epochen mit der geringsten Lage- und Höhenabweichung zum Sollpunkt auch die kleinste Anzahl an Satelliten auf. Es ist daher nicht ratsam, nur kurze Zeitintervalle mit wenigen Messepochen und ausschließlich hoher Satellitenanzahl (>6) zu verwenden. Zumal die Testmessungen gezeigt haben, dass im Durchschnitt nur 4-6 Satelliten für die Positionierung unter Bäumen zur Verfügung stehen und

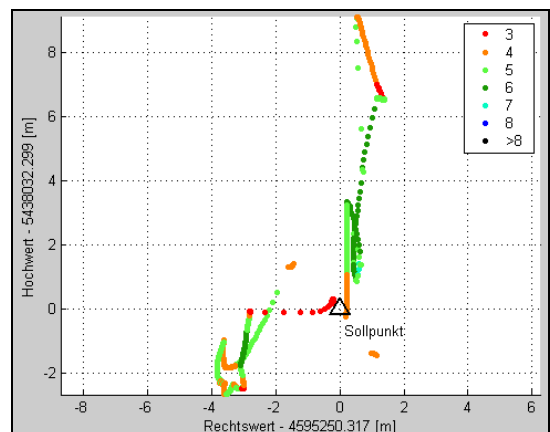


Abbildung 5-26: Satellitenanzahl vs. Sollpunkt

häufig auch nur weniger als 50 % der Messepochen eines Beobachtungsintervalls eine gültige Position aufweisen. In diesen Fällen muss der Einsatz eines *Sat-Filters*, der Epochen \leq einer hohen Mindestanzahl an Satelliten herausfiltert, kritisch gesehen werden. Hierdurch besteht die Gefahr, dass nur sehr wenige Positionen in die Mittelbildung des finalen Ergebnisses einfließen, deren Qualität gut aber auch relativ schlecht sein kann. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel mit dem in KONMEA implementierten Sat-Filter einer 15-Min.-Messung (900 Epochen) in einem Baumholz, bei dem die gefilterten Epochen grafisch markiert (rosa) sowie deren Anzahl alphanumerisch dargestellt werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass bei einem *Sat-Filter* > 5 Satelliten u. U. mit Beobachtungszeiten > 30 Min. zu rechnen ist, um eine ausreichende Anzahl an Positionen zu erhalten. Andernfalls sind auch Positionen mit 4 oder 5 Satelliten zu akzeptieren, die mittels zusätzlicher Kriterien auf ihre Qualität hin zu überprüfen sind. Hierzu werden weitere Aspekte und Ergebnisse aus den Testmessungen in den folgenden Kapiteln diskutiert.

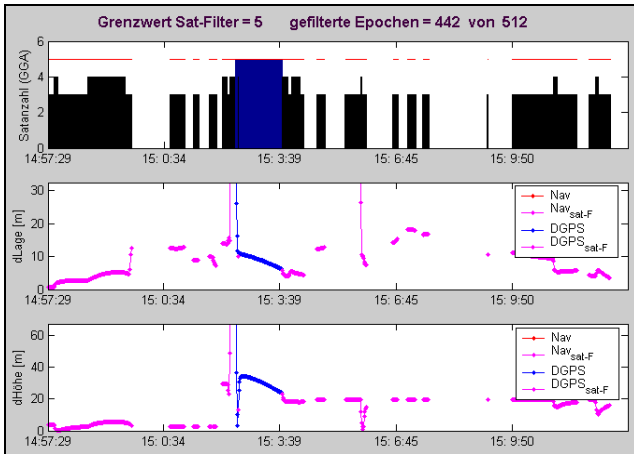


Abbildung 5-27: Beispiel KONMEA Sat-Filter

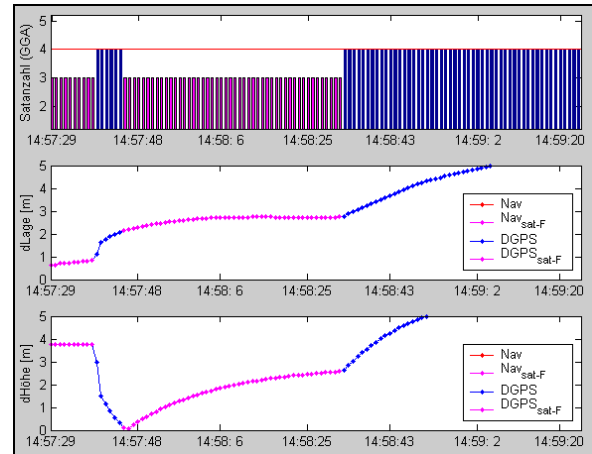


Abbildung 5-28: Beispiel Höhenverlauf bei 3 Satelliten

Allgemein bleibt festzuhalten, dass ein *Sat-Filter* für ein einfachen und zuverlässigen Bewertung der Positionsqualität nicht ausreicht. Allerdings ist die Anzeige der aktuellen Satellitenanzahl grundsätzlich zu empfehlen und in vielen Programmen mobiler GIS, zumindest in alphanumerischer Darstellung oder als Verlauf über die Zeit, bereits Standard. Als visuelle Hilfe zur Beurteilung des Ergebnisses bieten sich aber auch die in KONMEA realisierte *Positionsspur mit Satellitenanzahl* (s. Abbildung 5-26) oder die *Angabe der Häufigkeiten* (s. Abb. 5-24) an, da sie auf einfache Weise (und damit schnell) die Situation beschreiben. Außerdem ist ein solcher Filter notwendig, um Positionsergebnisse mit 3 Satelliten herauszufiltern, da hier das Gleichungssystem der GPS-Punktbestimmung nur eine 2D-Position mit fixierter Höhe als Ergebnis liefern kann (s. Kap. 3.4.2.1). Das bei den Testmessungen vor allem der gk12b, aber auch der hochpreisige GS50, dennoch oft eine (z. T. recht gute) 3D-Position bei 3 Satelliten ausgaben (s. Abb. 5-28), lässt vermuten, dass der Empfängeruhrenfehler in diesen Epochen intern geschätzt wird.

☛ Dilution of Precision (DOP):

Das stochastische Modell der GPS-Einzelpunktbestimmung ergibt sich zu

$$\sum_{xx} = \left(U^T \sum_{pp}^{-1} U \right)^{-1} \tag{Gl. 5-5}$$

- mit \sum_{xx} = Kovarianz der Unbekannten
- \sum_{pp} = Kovarianz der Beobachtungen
- U = Modellmatrix (4 x n)

Unter der Annahme, dass alle Pseudostrecken untereinander stochastisch unabhängig sind und sämtliche Varianzen σ_p^2 den gleichen Fehler aufweisen, vereinfacht sich die Kovarianzmatrix der Unbekannten zu

$$\sum_{xx} = \sigma_p^2 \cdot \left(U^T U \right)^{-1} = \sigma_p^2 \cdot Q_{xx} \tag{Gl. 5-6}$$

- mit $\sum_{pp} = \sigma_p^2 \cdot I$
- I = Einheitsmatrix
- Q_{xx} = Kofaktormatrix der Unbekannten

Mit diesem vereinfachten stochastischen Modell lassen sich sehr gut die *physikalischen* und *geometrischen* Einflüsse auf die GPS-Navigationslösung getrennt voneinander betrachten. Während die Standardabweichung der Pseudostrecken σ_p alle vorwiegend physikalisch bedingten Fehlerbeträge, wie etwa Restfehler der Ephemeriden oder des Messrauschens, beinhaltet, geben die Elemente der Hauptdiagonalen der Kofaktorenmatrix Q_{XX} die rein geometrisch bedingten - also nur von der Konfiguration Empfänger / Satellit abhängigen - Einflüsse wieder [WUNDERLICH 1993]. Die aus der Spur von $(U^T U)^{-1}$ abgeleiteten Werte werden als *DOP-Faktoren* bezeichnet und wirken wie ein Verstärkungsfaktor für die Standardabweichung σ_p , die oftmals durch die Größe *UERE* (*User Equivalent Range Error*) ausgedrückt wird und nach [ZEBHAUSER 2000] die Fehler aus Empfängerrauschen, Satellitenuhren, Ephemeriden und Atmosphäre im Entfernungsmaß beinhaltet. In Kombination mit dem *GDOP* (*Geometric Dilution of Precision*) kann so die Genauigkeit einer GPS-Einzelpunktbestimmung (Navigationslösung) angegeben werden zu

$$\sigma_{NAV} = \sigma_p \cdot \sqrt{\text{Spur}(U^T U)^{-1}} = \sigma_p \cdot \sqrt{q_{TT} + q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} = \sigma_p \cdot GDOP = UERE \cdot GDOP \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Mit dem GDOP erhält man ein *Maß über alles* [ZEBHAUSER 2000], der als mittlere Genauigkeit der Gesamtlösung angesehen werden kann und den wichtigsten geometrischen DOP darstellt. Weitere sind:

- für die dreidimensionale Position der *PDOP* (*Position Dilution of Precision*):

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} = \sigma_p \cdot \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} = UERE \cdot PDOP \quad (\text{Gl. 5-8})$$

- für die Empfängeruhrenkorrektur (Längenäquivalent) der *TDOP* (*Time Dilution of Precision*):

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_T^2} = \sigma_p \cdot \sqrt{q_{TT}} = UERE \cdot TDOP \quad (\text{Gl. 5-9})$$

Wird die Kofaktorenmatrix Q_{XX} in ein topozentrisches, nordorientiertes Koordinatensystem (U, V, W) transformiert oder sind die Empfänger- und Satellitenkoordinaten ohnehin in einem solchen definiert, dann lassen sich auch die folgenden Fehlermaße angeben:

- für die Lage der *HDOP* (*Horizontal Dilution of Precision*):

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_V^2} = \sigma_p \cdot \sqrt{q_{UU} + q_{VV}} = UERE \cdot HDOP \quad (\text{Gl. 5-10})$$

- für die Höhe der *VDOP* (*Vertical Dilution of Precision*):

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_W^2} = \sigma_p \cdot \sqrt{q_{WW}} = UERE \cdot VDOP \quad (\text{Gl. 5-11})$$

Zur Kontrolle der Koordinatentransformation muss gelten: $PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2}$ (Gl. 5-12)

Diese *klassischen* Genauigkeitsfaktoren gelten für die absolute GPS-Positionsbestimmung aus Code-Pseudostrecken und können nicht ohne weiteres auf Messungen von Basislinien mit Trägerphasenbeobachtungen übertragen werden [RICHTER 1999]. In diesem Fall sind speziell entwickelte DOP-Faktoren, wie z. B. der *Relative DOP* [GOAD 1988], *Bias DOP* [MERMINOD et al. 1990] oder *Bias PDOP* [MERMINOD, RIZOS 1994] zu verwenden. Da der Fokus der hier durchgeführten Untersuchungen auf Positionsergebnissen aus der Berechnung einer relativ zum Referenzpunkt korrigierten GPS-Einzelpunktbestimmung liegt (DGPS mit Code-Pseudorange Korrekturen) sind die klassischen DOPs grundsätzlich gültig.

In [WUNDERLICH 1993] wird gezeigt, dass sich für eine diskrete Konfiguration mit vier sichtbaren Satelliten der berechnete GDOP-Wert umgekehrt proportional zum Volumen des Tetraeders verhält, der von den Endpunkten E1 bis E4 der vier Einheitsvektoren Empfänger-Satellit aufgespannt wird (s. Abb. 5-29). Liegen alle Satelliten auf einem Kegelmantel und fällt die Spitze des Kegels mit dem Standpunkt des Empfängers zusammen, dann verschwindet das Volumen, der GDOP strebt gegen unendlich und die Lösung versagt. In diesem Fall spricht man von einer *gefährlichen Konstellation* oder *Outage-Situation*. Diese zeigt sich im Lageplot typischer Weise als ein geradliniges Weglaufen der Positionsspur, deren (Unsicherheits-)Richtung durch die Achse t des Drehkegels gegeben ist (s. Abb. 5-30).

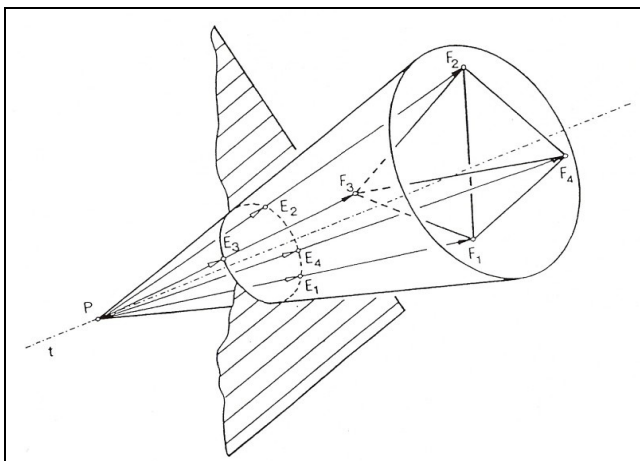


Abbildung 5-29: Outage-Situation [WUNDERLICH 1993]

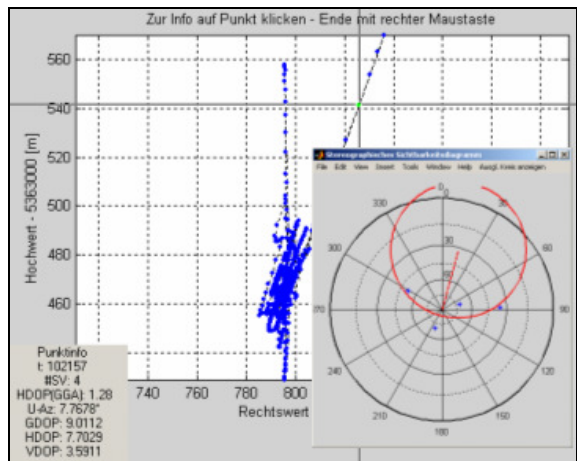


Abbildung 5-30: Outage Positionsspur und stereographisches Sichtbarkeitsdiagramm

Auch die Positionsspuren von GPS-Messungen im Forst weisen häufig ein solches Verhalten auf [CZAJA 2002b], so dass hier ein (negativer) Einfluss der Satellitengeometrie vermutet werden kann. Wird nun für die ebene Darstellung der, auf der Einheitskugel um den Standpunkt abgebildeten (Sub-)Satellitenbahnen eine stereographische Projektion verwendet, dann ist auf Grund der Kreistreue diese gefährliche Konfiguration sofort erkennbar. Denn wie in [WUNDERLICH 1993] erläutert, müssen die (Sub-)Satellitenpunkte im *stereographischen Sichtbarkeitsdiagramm* auf einem Kreis liegen, wenn sich die Satelliten (auch mehr als vier) auf den Erzeugenden eines Drehkegels befinden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Verbindung des Diagrammzentrums mit dem Bildkreismittelpunkt das Bild der Kegelachse und damit die Unsicherheitsrichtung im lokalen Horizontsystem anzeigt. Die Abbildung 5-30 zeigt hierzu ein Beispiel des in KONMEA realisierten stereographischen Sichtbarkeitsdiagrammes, das ein einfaches und praktisches Hilfsmittel für Beurteilung der momentanen Positionsqualität darstellt. Hierzu ist auch die Verwendung des aktuellen GDOP-Wertes zu zählen. In fast allen Applikationsprogrammen mobiler GIS, die eine NMEA-Datenschnittstelle nutzen, wird aber lediglich der HDOP angezeigt oder als (Filter-)Kriterium zur Bewertung der GPS-Positionen verwendet. Seltener kommen der PDOP und fast gar nicht der GDOP zum Einsatz, da dieser in den NMEA-Standarddatensätze GGA, GSV und GSA nicht enthalten ist. Allerdings reicht für eine Abschätzung des GDOPs die Kenntnis der Satellitenörter in Form von Azimut und Elevation der Satelliten 1-i im Standpunkt für die Berechnung der Modellmatrix U aus (s. Gl. 5-13).

Anhand der NMEA-Daten der Testmessungen wurde untersucht, inwieweit der GDOP in Kombination mit anderen Parametern, wie z.B. dem SNR oder der Satellitenanzahl, eine bessere Beurteilung der Positionsqualität ermöglicht. Das Ergebnis ist, dass die Kenntnis des GDOP-Wertes in einigen wenigen Fällen tatsächlich einen zusätzlichen Mehrwert bringt, die Berechnung aber ebenso wie bei der Nutzung von SNR-Daten von der Vollständigkeit der verwendeten NMEA-Daten abhängt. Diese war vor allem an Punkte mit schwierigen Messbedingungen häufig nicht gegeben, so dass gerade bei großen Lageabweichungen der GDOP falsch oder gar nicht zur Verfügung stand (s. Abb. 5-31). Eine Verbesserung der Bewertungsmöglichkeiten von GPS-Positionen ist in diesen Fällen leider nicht gegeben.

$$U = \begin{pmatrix} 1 & \cos(Elev_1)\cos(Az_1) & \cos(Elev_1)\sin(Az_1) & \sin(Elev_1) \\ 1 & \cos(Elev_2)\cos(Az_2) & \cos(Elev_2)\sin(Az_2) & \sin(Elev_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos(Elev_i)\cos(Az_i) & \cos(Elev_i)\sin(Az_i) & \sin(Elev_i) \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 5-13})$$

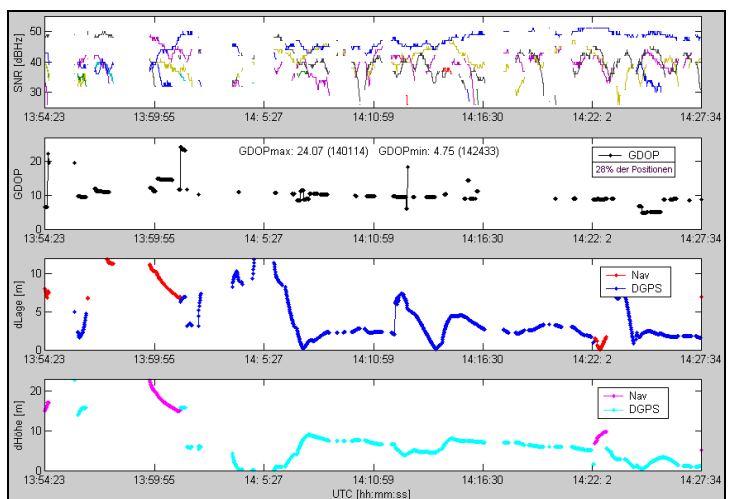


Abbildung 5-31: Beispiel lückenhafter Positionsraumdaten

5.3.5. Ansätze für neue Positionsraum-Filter

Die bisherigen Auswertungen auf Basis der drei NMEA-Standarddatensätzen GGA, GSA, GSV haben gezeigt, dass sowohl mit den klassischen (z. B. HDOP, Satanzahl) als auch den zusätzlichen (z. B. SNR, GDOP) Genauigkeitsparametern keine zufriedenstellende Verbesserung der Bewertung von NMEA-Positionsergebnissen möglich ist. Auch die bei vielen mobilen GIS-Applikationsprogrammen realisierte Angabe von statistischen Genauigkeitsmaßen, wie beispielsweise der *empirischen Standardabweichung* σ , dem *Circular Error Probable (CEP)* oder dem *Punktfehler nach Helmert (HPF)* (z. B. [MANSFELD 1998]), erlauben nur bedingt eine ausreichend zuverlässige Beurteilung der Positionsqualität. Die Gründe hierfür können eine sehr hohe Anzahl an Messwerten in kurzer Zeit (sehr hohe Redundanz), die Vernachlässigung von Korrelationen oder eine geringe absolute Genauigkeit der als *wahrscheinlichster Wert* verwendeten arithmetischen Koordinatenmittel bei gleichzeitig hoher Präzision der Messergebnisse sein. Vor allem letzteres führt zu relativ geringen Standardabweichungen der Koordinatenmittel, die auf Grund der Unkenntnis des wahren Wertes auch nur die *innere Genauigkeit* darstellen können. Hinzu kommt, dass viele Anwender bei der Beurteilung dieser Parameter nicht die zugrunde liegenden statistischen Wahrscheinlichkeiten (Sicherheiten) berücksichtigen, die beispielsweise bei einer empirischen Standardabweichung von 1σ nur 68,3 % oder bei dem CEP50 sogar nur 50 % betragen. Die Tabelle 5-17 zeigt als Beispiel die wahre Lageabweichung dL von Messungen mit einem Beobachtungsintervall von 5 Minuten und einer Messfrequenz von 1 Hz auf mehreren, unterschiedlich abgeschatteten Punkten, gegenüber verschiedene ein- und zweidimensionalen Genauigkeitsmaßen.

Abschattung Messpunkt	Anzahl Beob.	dL [m]	σ _Koordinatenmittel		σ _Einzelkoordinate		HPF [m]	Diff. dL [m]	CEP50 [m]	Diff. dL [m]
			σ _X	σ _Y	σ _X	σ _Y				
gering	230	0,28	0,00	0,01	0,03	0,08	0,08	0,20	0,06	0,22
gering	301	1,14	0,00	0,01	0,02	0,10	0,11	1,03	0,07	1,06
gering-mittel	901	0,94	0,01	0,00	0,18	0,12	0,22	0,72	0,18	0,76
gering-mittel	234	4,18	0,00	0,01	0,02	0,21	0,21	3,97	0,14	4,05
mittel	119	0,75	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,72	0,02	0,73
mittel	218	2,02	0,03	0,05	0,43	0,77	0,88	1,14	0,71	1,32
mittel	252	1,13	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	1,09	0,03	1,10
mittel	290	1,46	0,01	0,01	0,09	0,09	0,12	1,33	0,10	1,35
mittel	301	0,45	0,01	0,01	0,12	0,14	0,18	0,26	0,15	0,29
mittel	271	3,04	0,00	0,00	0,03	0,05	0,06	2,98	0,05	2,99
mittel	301	5,00	0,01	0,01	0,24	0,21	0,32	4,68	0,27	4,73
mittel	283	1,82	0,02	0,02	0,30	0,35	0,47	1,35	0,39	1,43
mittel	126	0,79	0,01	0,00	0,11	0,04	0,12	0,67	0,09	0,70
mittel	52	0,83	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,81	0,01	0,82
mittel-stark	263	0,78	0,01	0,02	0,16	0,24	0,29	0,49	0,24	0,54
mittel-stark	251	1,55	0,02	0,10	0,35	1,55	1,59	-0,05	1,12	0,42
mittel-stark	266	4,02	0,07	0,11	1,11	1,73	2,05	1,97	1,67	2,35
mittel-stark	293	1,03	0,05	0,05	0,86	0,80	1,17	-0,15	0,98	0,05
stark	205	0,26	0,04	0,07	0,52	1,02	1,14	-0,88	0,90	-0,64
stark	255	0,74	0,02	0,05	0,30	0,81	0,87	-0,13	0,66	0,08
stark	274	0,88	0,01	0,01	0,13	0,22	0,25	0,63	0,21	0,68
stark	242	1,51	0,01	0,01	0,14	0,22	0,26	1,25	0,21	1,30
stark	180	2,95	0,17	0,19	2,23	2,58	3,41	-0,46	2,83	0,11
stark	135	2,94	0,06	0,16	0,65	1,91	2,01	0,93	1,51	1,43
sehr stark	258	2,61	0,08	0,19	1,24	3,04	3,28	-0,67	2,52	0,09
sehr stark	235	2,58	0,02	0,03	0,28	0,44	0,52	2,05	0,43	2,15
sehr stark	174	7,96	0,26	0,35	3,36	4,64	5,73	2,23	4,72	3,24
sehr stark	300	8,47	0,09	0,08	1,61	1,32	2,08	6,39	1,73	6,75

Tabelle 5-17: Vergleich statistischer 2D-Genauigkeitsmaße mit wahrer Lageabweichung

Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass sich bei einer Reihe von ausgewerteten Punkten bereits durch die Visualisierung der Positionsspur ein Hinweis auf die Qualität der Messung ergab, werden in den folgenden Kapiteln verschiedene Filteransätze beschrieben, die *nur den geometrischen und zeitlichen Verlauf der Positionsspur* berücksichtigen. Zumal die ausschliessliche Verwendung von Positionsdaten auch den Vorteil hat, nur von der Verfügbarkeit einer Position und nicht von der Vollständigkeit der Datensätze abhängig zu sein, wie das bei einigen der oben beschriebenen Genauigkeitsparameter der Fall ist. Eine Darstellung und Bewertung der mit diesen Filtern erreichten Ergebnisse folgt in Kapitel 5.4.

Cluster-Filter

Dieser Filter basiert auf der Überlegung, dass die Spur von Positionsergebnisse bei ungestörtem Signalempfang in der Regel eine Punktwolke darstellt, in deren Zentrum (im Idealfall) die korrekte Position liegt. Ein geradliniges „Fortlaufen“ der Positionsspur über längere Zeit kann demnach als ein Hinweis auf fehlerhafte Positionen gedeutet werden, die ggf. von dem Endergebnis auszuschließen sind. Der in KONMEA realisierte *Cluster-Filter* erlaubt die Identifikation von Punktwolken anhand eines *maximal zulässigen Abstands zwischen einer Position und dem aktuellen Clusterschwerpunkt* sowie einer *Mindestanzahl an Position in einem Cluster*. Hierzu werden die Positionen sequentiell auf diese beiden Kriterien hin überprüft und nach der Clusterbildung farblich dargestellt (s. Abb. 5-32) sowie diverse numerische Ergebnisse ausgegeben (z. B. die Standardabweichung der Clusterpunkte oder der Abstand zwischen den Schwerpunkten). Zu Testzwecken kann die Lageabweichung der Clusterschwerpunkte zu einem Sollpunkt berechnet werden.

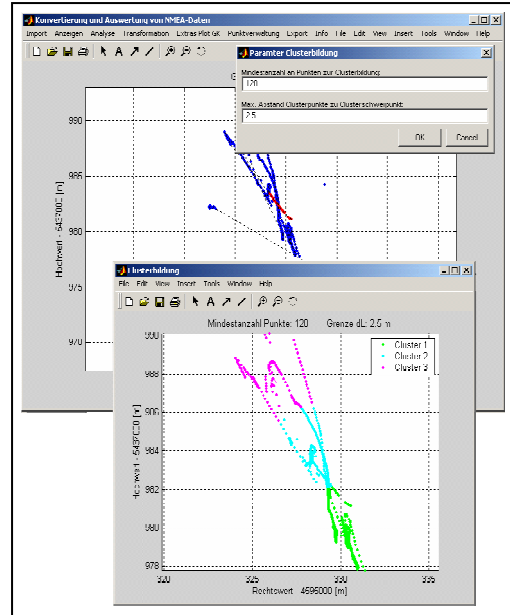


Abbildung 5-32: Beispiel Cluster-Filter

v-Filter

Eine weitere Möglichkeit „weglaufende“ Positionen im Endergebnis auszuschließen, stellt die Filterung anhand der vorliegenden Geschwindigkeit zwischen den Positionen einzelner Epochen dar. In den Abbildungen 5-33 und 5-34 ist jeweils ein Beispiel für ein solchen *v-Filter* gegeben, der Positionen mit einer Geschwindigkeit größer eines vom Nutzer festgelegten Grenzwertes v_{Grenz} nicht mehr berücksichtigt. Die Darstellung der aktuellen Geschwindigkeit sowie Lage- und Höhenabweichung zum Sollpunkt erfolgt in Kombination mit verschiedenen Parametern (z. B. HDOP, Satellitenanzahl, SNR, Elevation). Gefilterte Epochen werden im Plot gelb markiert, die gefilterte Positionsspur angezeigt (Abb. 5-35) und folgende Ergebnisse ausgegeben:

Ergebnis v-Filter mit $v_{grenz} = 0.05$ [m/s] vom 03-Nov-2005 11:59:04:
 Es wurden 522 von 1706 möglichen Positionen herausgefiltert.
 Soll - Mittelwert Restpunkte: $dL = 0.69$ m $dH_{abs} = 4.65$ m

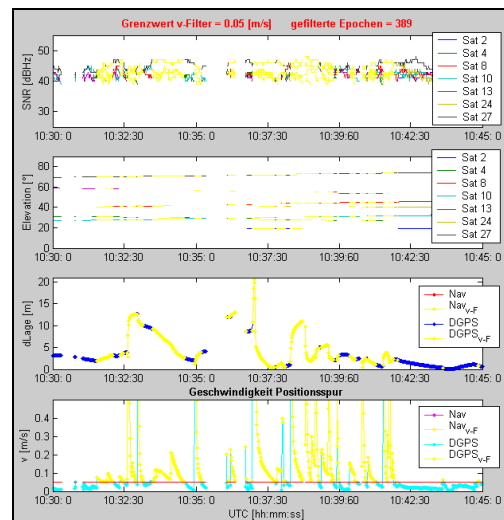


Abbildung 5-33: v-Filter mit SNR/Elevation

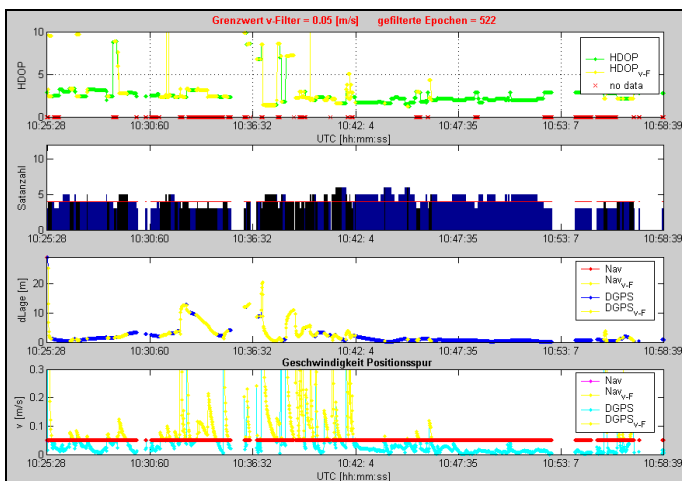


Abbildung 5-34: v-Filter mit HDOP/Satellitenanzahl

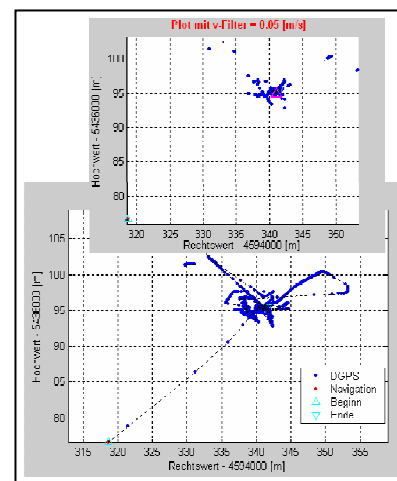


Abbildung 5-35: Positionsspur nach v-Filter (s. o.)

☛ SubIntervall-Filter (Zeit/Positionen)

Liegt ein ausreichend langes Beobachtungsintervall vor (> 20-30 min), dann ist es für die Bewertung der Ergebnisse unter Umständen hilfreich, das Intervall in *SubIntervalle* zu unterteilen und die für jedes Teilintervall getrennt berechneten Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Liegen diese nah beinander, dann kann dies ein Hinweis auf eine korrekte Lösung sein und hilft, das Risiko bzgl. Ausreißern oder groben Fehlern zu minimieren. Hierbei ist aber zu beachten, dass bei gleichlangen (Zeit-)Intervallen eine sehr unterschiedliche Anzahl an Positionen pro Intervall vorliegen kann, so dass der jeweilige Stichprobenumfang sehr unterschiedlich oder sogar zu klein für einen Vergleich der Intervallergebnisse ist. Daher wurde in KONMEA auch ein SubIntervall-Filter realisiert, der eine Teilung in Intervalle mit gleich großer Anzahl an Positionen erlaubt. Bei beiden Filtertypen werden die Anzahl der Teilintervalle und die jeweilige Position der Schwerpunkte in einem Plot zusammen mit HDOP, Satellitenanzahl sowie Lage- und Höhenabweichung zu einem Sollpunkt angezeigt. Die Abbildung 5-36 zeigt das Ergebnis eines SubIntervall-Filters nach der Zeit. Zusätzlich erfolgt eine Ausgabe folgender numerischer Ergebnisse am Bildschirm:

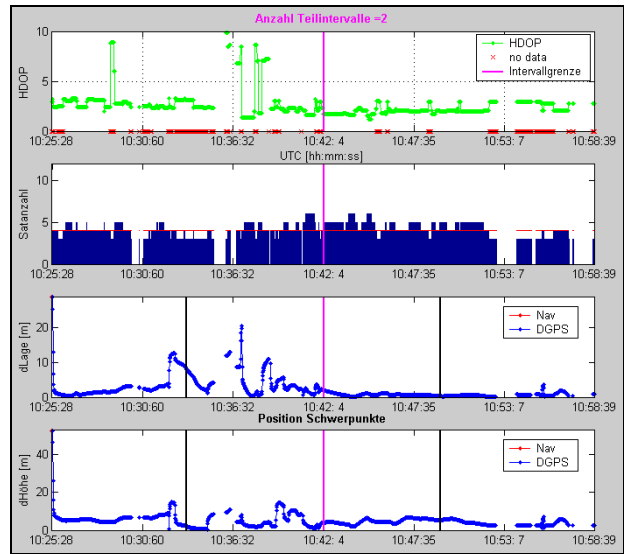


Abbildung 5-36: SubIntervall-Filter nach Zeit

Ergebnisse Sub-Intervalle **ZEIT** vom 03-Nov-2005 11:42:22:

1. Subintervall: Posanzahl= 886 | Intervalldauer= 995 Sec. (16 Min. 34 Sec.) | dL_Soll=1.48 m | dH_Soll=4.38 m
 2. Subintervall: Posanzahl= 820 | Intervalldauer= 995 Sec. (16 Min. 34 Sec.) | dL_Soll=0.43 m | dH_Soll=4.16 m
- Schwerpunkt 1. - 2.: dL= 1.09 m dH=-0.22 m | Zeitabstand= 15 Min. 32 Sec.

Ergebnisse Sub-Intervalle **POS** vom 03-Nov-2006 11:56:18:

1. Subintervall: Posanzahl= 853 | Intervalldauer= 962 Sec. (16 Min. 2 Sec.) | dL_Soll=1.54 m | dH_Soll=4.51 m
 2. Subintervall: Posanzahl= 853 | Intervalldauer=1028 Sec. (17 Min. 7 Sec.) | dL_Soll=0.45 m | dH_Soll=4.04 m
- Schwerpunkt 1. - 2.: dL= 1.19 m dH=-0.47 m | Zeitabstand= 15 Min. 34 Sec.

☛ Epochen-Filter

Bei der Auswertung der in Kapitel 5.2 beschriebenen Testmessungen fiel auf, dass vor allem häufig unterbrochene NMEA-Datenreihen ungewöhnlich große Positionssprünge aufwiesen, während Bereiche mit kontinuierlich folgenden Datensätzen ein stabileres Positionsergebnis lieferten. Dies ist auch zu erwarten, da - je nach Empfängertyp - ein durchgehender Empfang von einer ausreichenden Anzahl an Satellensignalen eine bessere Glättung bzw. Filterung dieser erlaubt. Es liegt daher nahe, neben der lageorientierten Filterung von Positionen (s. Cluster-Filter) auch die Möglichkeiten einer *zeitbasierten Filterung* von Messepochen zu untersuchen. Hierzu wurde der *Epochen-Filter* in KONMEA implementiert, der alle Intervalle mit einer geringeren Anzahl an zusammenhängenden Messepochen als im Grenzwert Epo_{Grenz} festgelegt (s. Abb. 5-37) herausfiltert. Die nicht berücksichtigten Epochen werden, wie bei den o. g. Filtern, in einem Plot mit HDOP, Satellitenanzahl sowie Lage- und Höhenabweichung zum Sollpunkt gelb markiert und eine Zusammenfassung der numerischen Ergebnisse ausgegeben.

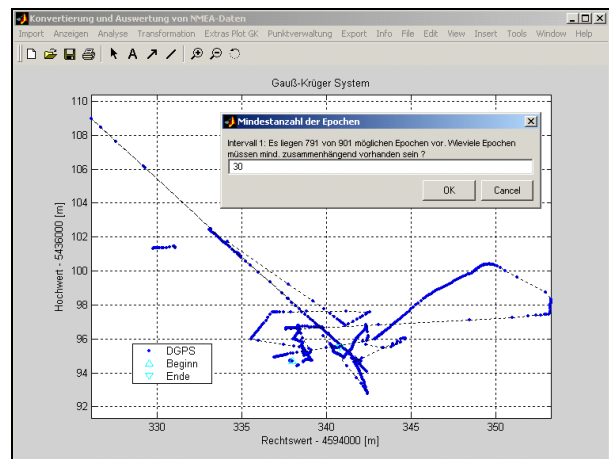


Abbildung 5-37: Eingabe Epochen-Filter

Ergebnis Epochen-Filter mit mind. 120 Epochen für Intervall 1 vom 05-Nov-2005 15:01:21:

Es wurden 415 von 1215 möglichen Epochen mit Positionen herausgefiltert.
Soll - Mittelwert ungefilterte Punkte: dL = 1.59 m dH_abs = 8.56 m

☛ DGPS-Nav-Filter

Aus den Ergebnissen der Testmessungen kann noch ein weiterer Ansatz für einen Positionsraum-Filter abgeleitet werden. Der *DGPS-Nav-Filter* zielt darauf ab, auch Positionen von Navigationslösungen mit einer vorab definierten Lagegenauigkeit in das endgültige Positionsergebnis miteinzubeziehen. Von der Annahme ausgehend, dass der Schwerpunkt aller DGPS-Positionen eine relativ hohe Positionsgenauigkeit aufweist, werden GPS-Positionen mit einer zu diesem Schwerpunkt über den Grenzwert $dL_{DGPS-NAV}$ definierbare Lageabweichung im Endergebnis mitberücksichtigt. Die restlichen Positionen von Navigationslösungen werden herausgefiltert und in dem Ergebnisplot gelb markiert (s. Abb. 5-38). Durch dieses Vorgehen kann die Anzahl an Positionen, die dem Endergebnis zugrunde liegt, und damit auch dessen Zuverlässigkeit erhöht werden. Vor allem bei Messungen, die aufgrund starker Signalabschattungen nur sehr wenige gültige Positionen aufweisen, könnte sich dieser Filter positiv auswirken. Neben der grafischen Ergebnisdarstellung werden auch noch die folgenden numerischen Ergebnisse ausgegeben:

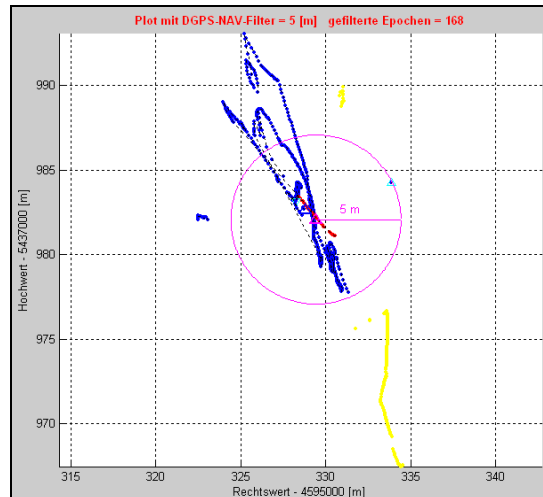


Abbildung 5-38: Beieplerggebnis DGPS-Nav-Filter

Ergebnis DGPS-NAV-Filter mit NAV-Positionen < 5 m vom DGPS-Schwerpunkt vom 05-Nov-2006 16:27:33:
 Es wurden 168 von 1215 möglichen Positionen herausgefiltert (13.8 Prozent).
 Soll - Mittelwert ungefilterte Punkte: $dL = 0.85\text{ m}$ $dH_{abs} = 5.51\text{ m}$

☛ Multi-Filter

Bei der Auswertung von NMEA-Datensätzen mit der Analysesoftware KONMEA können die oben beschriebenen Filter auf alle vorliegenden Datensätze oder auch auf die Ergebnisse von vorhergehenden Filterungen angewendet werden. Dies ermöglicht beliebige Kombinationen durch manuelle Auswahl der Filter einerseits und die semi-automatische Filterung in einer fest vorgegebenen Reihenfolge andererseits. Der Einsatz solcher vordefinierter *Multi-Filter* stellt die einzige, effiziente Möglichkeit einer kombinierten Filterung über verschiedene Parameter dar. Da sich die Reihenfolge der einzelnen Filter auf das endgültige Resultat auswirken kann, wurden im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Varianten definiert:

- der *Multi-Filter1* mit *Sat- / Epochen-Filter*,
- der *Multi-Filter2* mit *Sat- / HDOP- / Epochen- / v- / SubIntervall-Filter*,
- der *Multi-Filter3* mit *Sat- / DGPS-Nav- / HDOP- / Epochen- / v- / SubIntervall-Filter*.

Hierbei entsprechen die grafischen und numerischen Ergebnisdarstellungen denen der oben beschriebenen Einzelfilter. Zusätzlich wird bei allen Zwischenschritten die aktuelle Anzahl an noch vorliegenden Epochen gegenüber der ursprünglichen Gesamtanzahl angegeben.

5.3.6. Ergebnisse Positionsraum-Filter

Die Leistungsfähigkeit der beschriebenen Positionsraum-Filter wurde anhand von Testdaten zweier unterschiedlicher GPS-Empfängern auf ausgewählten, unterschiedlich abgeschatteten Referenzpunkten untersucht (s. Tab. 5-18). Hierbei lieferte keiner der einzeln verwendeten Filter ausreichend eindeutige Resultate, die eine zuverlässigere Bewertung der vorliegenden Positionsqualität ermöglichen würde. Daher beschränkt sich die Ergebnisdarstellung an dieser Stelle auf die Resultate der Multi-Filter 2 und 3. Diese stellen durch die Kombination von mehr als zwei Einzelfiltern und einem semi-automatischen Durchlauf nicht nur eine praxisgerechtere Lösung dar, sondern weisen zum Teil auch ein höheres Potential für signifikantere Ergebnisse auf. Die Ergebnisse des Multi-Filter 1 werden hier nicht näher betrachtet, da der Filter ebenfalls keine bessere Beurteilung der gefilterten Positionen erlaubte.

Abschattung	Anzahl
Freifläche	1
Baumholz	4
Dickung	2
Stangenholz	4
Totholz	2

Tabelle 5-18: Testpunkte Positionsraum-Filter

Der Cluster-Ansatz wurde im Multi-Filter nicht berücksichtigt, da er sich auf Grund einer häufig sehr hohen Anzahl einzelner Cluster (viele Teilergebnisse) lediglich als visuelles Hilfsmittel eignet. Zudem haben die Berechnungen auf den Referenzpunkten ergeben, dass in mehr als der Hälfte der Fälle (58 %) die Punktwolke mit der größten Anzahl an Positionen ein schlechteres Ergebnis hinsichtlich der Lage- und Höhenabweichung zu einem Sollpunkt ergeben hat als das Mittel über alle Datensätze einer Messung. Nur in 25 % der Fälle ergab sich eine bessere Lösung, während 17 % der Ergebnisse in etwa die gleichen Abweichungen aufwiesen. In den Tabellen 5-19 und 5-20 sind die Ergebnisse der Multi-Filter 2 und 3 zusammengefasst. Sie zeigen, in wie vielen Fällen sich nach der jeweiligen Filterung eine bessere, gleich gute oder schlechtere Lage-oder Höhenabweichung gegenüber einer Mittelung über alle ungefilterte Datensätze ergeben hat. Dabei wurden bei jeder Filterung nur die verbliebenen Epochen (Restepochen) des vorhergehenden Filters berücksichtigt. Die verwendeten Testdaten umfassen eine Beobachtungsdauer von 30 Minuten bei einer Messfrequenz von 1 Hz. Die Ergebnisse führen zu den folgenden Erkenntnissen:

- Hinsichtlich der Lagegenauigkeit verschlechtert sich das Verhältnis zwischen Ergebnisverbesserung und -verschlechterung, während es sich bei der Höhengenuigkeit etwas verbessert.
- Die abschließende Bewertung durch den SubInt-Filter trägt fast immer zur Verschlechterung bei, wobei die hier berechneten Intervallschwerpunkte zwischen 7 und 20 Minuten auseinanderlagen.
- Risiken: geringe Anzahl an Restepochen, v-Filter erfasst kein langsames Wegdriften der Position.
- Eine zuverlässigere Beurteilung der Positionsqualität ist mit den Filter-Ansätzen nicht möglich, da ein signifikanter Bewertungsparameter fehlt. Sie können lediglich als zusätzliches visuelles Hilfsmittel verwendet werden. Eine durchgreifende Kontrolle der Ergebnisse ist nur durch die in der Geodäsie weit verbreitete Methode der Wiederholungsmessung zu unterschiedlichen Zeitpunkten möglich.

Multi-Filter 2														
Anzahl Auswertungen = 20														
1. Ergebniszeile: Anzahl Ergebnisse mit Lageabweichung 👍 besser, = gleich gut, 👎 schlechter als Mittel über alle Epochen														
2. Ergebniszeile: Anzahl Ergebnisse mit Höhenabweichung 👍 besser, = gleich gut, 👎 schlechter als Mittel über alle Epochen														
1. Sat-Filter			2. HDOP-Filter			3. Epochen-Filter			4. v-Filter			5. SubInt-Filter		
Grenzwert = 4			Grenzwert = 4			Grenzwert = 30			Grenzwert = 0.05			Anzahl Int. = 2		
👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	Bessere Bewertung möglich:		
2	10	8	4	7	9	5	6	8	5	6	8			
👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎
6	8	6	9	5	6	9	6	4	7	6	6	1	9	9
Bemerkung: 5 x > 50 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 3 x > 80 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 1 x 100 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 1 x keine Daten, 1 x > 70 % der Daten gefiltert			Bemerkung: Zeitintervalle Mittlere Anzahl der Restepochen 51,6 %		

Tabelle 5-19: Ergebnisse Multi-Filter 2

Multi-Filter 3																	
Anzahl Auswertungen = 20																	
1. Ergebniszeile: Anzahl Ergebnisse mit Lageabweichung 👍 besser, = gleich gut, 👎 schlechter als Mittel über alle Epochen																	
2. Ergebniszeile: Anzahl Ergebnisse mit Höhenabweichung 👍 besser, = gleich gut, 👎 schlechter als Mittel über alle Epochen																	
1. Sat-Filter			2. DGPS/Nav-Filter			3. HDOP-Filter			4. Epochen-Filter			5. v-Filter			6. SubInt-Filter		
Grenzwert = 4			Grenzwert = 3 m			Grenzwert = 4			Grenzwert = 30			Grenzwert = 0.05			Anzahl Int. = 2		
👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	Bessere Bewertung möglich:		
2	10	8	4	11	5	5	6	9	6	6	7	6	4	9			
👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎	👍	=	👎
6	8	6	4	11	5	10	4	6	9	5	5	8	5	6	2	6	11
Bemerkung: 5 x > 50 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 3 x > 80 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 2 x > 80 % und 1 x 100 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 1 x keine Daten, 3 x > 50 % der Daten gefiltert			Bemerkung: 1 x keine Daten, 1 x > 70 % der Daten gefiltert			Bemerkung: Zeitintervalle Mittlere Anzahl der Restepochen 45,3 %		

Tabelle 5-20: Ergebnisse Multi-Filter 3

5.4. Zusammenfassende Bewertung

Verschiedene Empfänger konnten sowohl unter exakt gleichen Umweltbedingungen als auch identischer Satellitenkonstellation im statischen und kinematischen Einsatz verglichen werden. Es zeigte sich, dass teure GPS-Technologie im Vergleich zu low-cost Empfängern auch höhere Genauigkeiten bei der statischen Punktaufnahme liefert. Ob dies letztendlich eine Anschaffung rechtfertigt sollte im Einzelfall durch eine Kosten-Nutzen Analyse der geplanten Anwendung entschieden werden, zumal für reine Navigationsaufgaben auch preisgünstige Sensoren ausreichen. Grundsätzlich ist dann auch die Ausstattung der verwendeten Systeme zu berücksichtigen (z.B. Anzahl der Einzelkomponenten, Datenbank, Berechnungsfunktionen, etc.), die nicht Gegenstand dieser Untersuchung war. Die mit DGPS maximal erreichbare Genauigkeit von 1-3 m ist für viele forstliche Applikationen ausreichend. Die Messungen zeigen aber auch die Grenzen von differentiell korrigiertem GPS im Wald auf. Dies bezieht sich nicht nur auf die erreichbare Genauigkeit, sondern vor allem auf die Zuverlässigkeit der Positionsergebnisse und die Verfügbarkeit mobiler Datenkommunikation in ländlichen Regionen. Sehr unterschiedliche oder ständig wechselnde Abschattungssituationen in Kombination mit ungünstiger Satellitenkonstellation und fehlendem Korrekturdatensignal können auch von einem „High-Tech-Empfänger“ nicht kompensiert werden, so dass man immer auch mit einem zeitweisen oder lokalem Versagen der satellitengestützten Positionierung in forstlicher Umgebung rechnen muss. In diesen Fällen bietet sich der Einsatz eines zusätzlichen, nicht satellitengestützten Sensors an, der die Messungen von der letzten gültigen GPS-Position fortsetzt. Ein solcher Positionierungssensor und das hierfür geeignete Messverfahren eines 3D-Polarzuges wird im folgenden Kapitel 6 vorgestellt.

Soll ein sensorgestütztes mobiles GIS möglichst unabhängig von der Hardware bestimmter Hersteller einsetzbar sein, dann können nur Daten des Positionsraumes in Form von NMEA-Standarddatensätzen genutzt werden. Dies schränkt die Bewertungsmöglichkeiten der Positionsqualität ein, da nur eine begrenzte Anzahl an Parametern und keine Beobachtungsdaten zur Verfügung stehen. Werden zusätzlich zu den bisher verwendeten Bewertungsparametern HDOP, Status (GPS/DGPS) und diversen statistischen Genauigkeitswerten noch Größen, wie das DGPS-Alter, das SNR, der GDOP oder spezielle Positionsraum-Filter, die den geometrischen und zeitlichen Verlauf der Positionsspur berücksichtigen und entsprechend visuell darstellen, eingesetzt, dann erhöhen sich die Möglichkeiten für eine zuverlässigere Bewertung der Positionsqualität nur geringfügig. Zum einen hängen einige Parameter von der Vollständigkeit der Datensätze ab, die im Rahmen der Testmessungen nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben war, zum anderen fehlen signifikante Kriterien für eine eindeutige Identifikation von Positionsfehlern. Daher wird im folgenden Kapitel ein neuer innovativer Ansatz zur Positionierung in waldreichen und topographisch strukturierten Gebieten vorgestellt, der in Verbindung mit einem handgetragenen 3D-Polarsensor und Daten eines hochgenauen DGMS lediglich eine GPS-Näherungsposition benötigt.

Trotzdem, der positive Eindruck von GPS-Messungen im Forst überwiegt bei weitem und es bleibt festzuhalten, dass die Satellitenpositionierung letztendlich eine bestechende Möglichkeit darstellt, eine dreidimensionale Positionsbestimmung in kurzer Zeit oder sogar in Echtzeit durchzuführen. Resultat ist eine Steigerung der Effektivität und Qualität forstlicher Arbeitsvorgänge beim Vermessen oder Navigieren.

6. Positionierung mit handgetragenem 3D-Polarsensor

Das Ziel der zweiten SmobGIS-Positionierungskomponente ist die *terrestrische, relative* und *dreidimensionale* Punktbestimmung mit dem handgetragenem 3D-Polarsensor *LaserAce300* (LA300). Die hiermit zu realisierenden 3D-Positionsgenauigkeit hängt von der Zielapplikation (Objekterfassung / Navigation) sowie dem räumlichen Bezug (absolut / relativ) ab und liegt zwischen wenigen dm und mehreren Metern.

6.1. Sensorkomponenten und Beobachtungsgrößen LaserAce 300

Der LaserAce 300 besteht aus einem *richtungsgebenden Sensor*, einem *Distanz-* und einem *Neigungsmesser*, so dass auch von einem hybriden Vermessungssystem gesprochen werden kann [SCHLEMMER 1998]. Um das Leistungsvermögen des Gesamtsystems (3D-Polarsensor) beurteilen zu können, ist eine Betrachtung der Einzelsensoren notwendig. Daher werden in den folgenden Kapiteln die im LaserAce300 verwendeten Sensorkomponenten hinsichtlich ihres Funktionsprinzips und der resultierenden Beobachtungsgröße sowie den für die SmobGIS-Applikationen relevanten Fehlereinflüssen näher betrachtet.

6.1.1. Richtungsbestimmung mit Magnetsensor

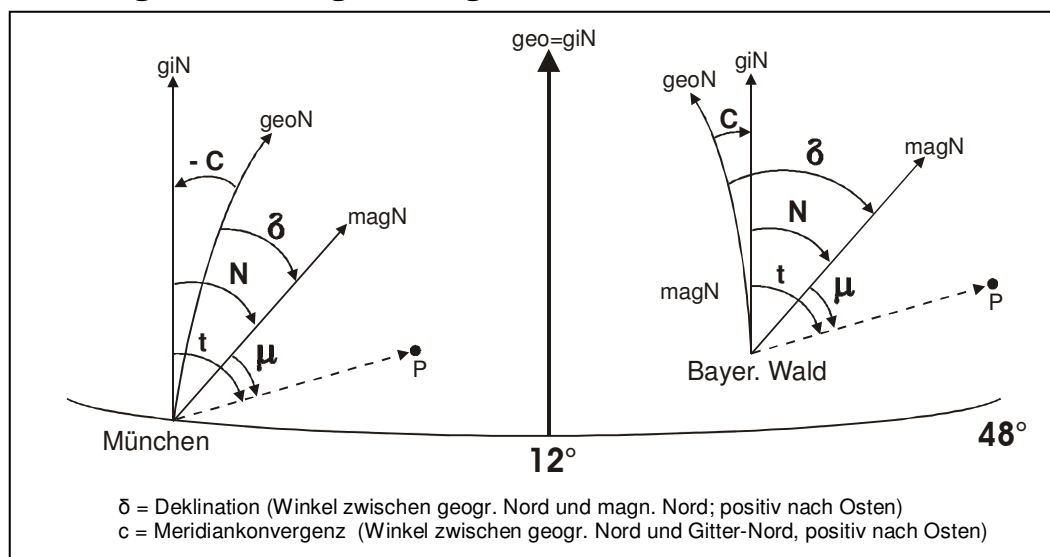


Abbildung 6-1: Koordinatensysteme bei Richtungsbestimmung mit Magnetsensor

Mit dem im LaserAce 300 optional integrierbaren, digitalen 3-Achsen-Fluxgate-Kompass kann, wie in Abbildung 6-1 für die hier relevanten Messgebiete dargestellt, zu einem beliebigen Zielpunkt das magnetische *Azimet* μ bzgl. der magnetischen Nordrichtung bestimmt werden. Der für die Koordinierung von Objekten im ebenen, rechtwinkligen und nach Gitter-Nord orientiertem Gauß-Krüger-Koordinatensystem notwendige *Richtungswinkel* t ergibt sich unter Berücksichtigung der *Nadelabweichung* N zu

$$t = \mu + N \quad \text{mit } N = |\delta| \pm |c| \quad (\text{Gl. 6-1})$$

Die ortsabhängige *Meridiankonvergenz* c lässt sich ausreichend genau mit den aus der Landesvermessung bekannten Formeln berechnen (z. B. [SCHNÄDELBACH 1998]). Die *Deklination* δ ist hingegen durch die Inhomogenität des Erdmagnetfeldes sowie seinen zeitlichen Schwankungen nicht nur orts-, sondern auch zeitabhängig. Man unterscheidet dabei zwischen *täglicher Variation* (ca. $0,2^\circ$; bis zu 1° bei starker Sonnenaktivität) und *Säkularvariation* (ca. $0,1^\circ/\text{Jahr}$). Um die aktuelle Deklination zu ermitteln, bietet sich die Nutzung der in Echtzeit im Internet dargestellten Messungen des Erdmagnetfeldes und die jährlich veröffentlichte Magnetfeldkarte eines Geophysikalischen Observatoriums an (z. B. Fürstfeldbruck). Daraus kann der für den Messort gültige Wert δ auf ca. $0,1^\circ$ genau interpoliert werden, was für Anwendungen mit einer Genauigkeit von einem bis wenigen Metern ausreicht [CZAJA 2003c]. Bei höheren Genauigkeiten ist ein zeitreferenzierter Abgleich der vor Ort ermittelten Beobachtungen mit den vom Geophysikalischen Observatorium im Minutenintervall ermittelten Werten möglich. Da hierbei nur die zeitliche Veränderung der Deklination von Interesse ist, spielt die Entfernung zum Messort keine Rolle.

Die größte Fehlerquelle bei der Verwendung eines elektromagnetischen Kompasses ergibt sich durch *lokale Störfelder*, die durch elektronische Bauteile des eigenen Sensors oder aber durch zusätzliche elektronische Geräte, Metallteile, Autos oder Hochspannungsmasten erzeugt werden und Azimutfehler von mehreren Grad verursachen können [CARUSO 1999]. Die aktuelle Nadelabweichung ergibt sich dann zu

$$N = |\delta| \pm |c| + d\mu \quad \text{mit } d\mu = \text{Störeinfluss magnetisches Azimut} \quad (\text{Gl. 6-2})$$

Um den Störeinfluss $d\mu$ zu quantifizieren, bieten die Hersteller spezielle Kalibrierungsroutinen an, die z. B. vor Ort eine Kompassdrehung und Kippung über den gesamten Horizontkreis nach bestimmten Regeln erfordern. Eine solche Routine ist auch beim LA300 integriert, dauert ca. 2 Minuten und erlaubt laut Hersteller, das magnetische Azimut mit einer Genauigkeit von besser als 1° zu bestimmen (s. Tab. 6-1). Problem ist nur, dass viele lokale Störfelder ebenfalls orts- und zeitvariabel sind, so dass eine permanente Kalibrierung notwendig wäre. Deshalb wird in [RESNIK 2001] für die Erfassung von GIS-Daten *im bebauten Gebiet* mit polaren Freihandmesssystemen ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem parallel zur Objekterfassung die aktuelle Nadelabweichung über koordinativ bekannte Referenzpunkte direkt abgeleitet wird. Diese liegen z. B. in Form von Hausecken in einem bereits existierenden Geodatenbestand vor, der auf einem mobilen Rechner vorgehalten wird. Eine Vorabbestimmung von δ und c entfällt somit ebenfalls. Dieses Vorgehen wird heute auch bei der Bussolentachymetrie der topographischen Geländeaufnahme in Bayern angewendet [SCHMITT, MÖST 2002], ist aber in Verbindung mit dem Einsatz von SmobGIS im NP Bayerischer Wald oder in anderen Gebieten ohne ausreichend dichtem sowie genauem Geodatenbestand ungeeignet. Hierfür sind neue Verfahren, wie in Kap. 6.4 vorgestellt, notwendig. Weitere Details zu technischen Grundlagen von elektromagnetischen Kompassensoren und zu Aspekten der Azimutkalibrierung finden sich u. a. in [CARUSO et al. 1998] oder [LANGLEY 2003].

Typ	3-Achsen Fluxgate
Messbereich	0° bis 360°
Genauigkeit	besser als 1°
Auflösung	0,1°

Tabelle 6-1: Digitalkompass LaserAce 300 [MDL 2001]

6.1.2. Distanzmessung mit Laserimpulsen

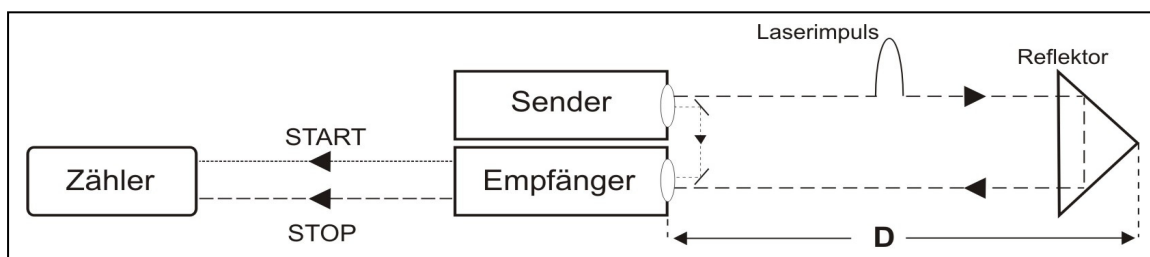


Abbildung 6-2: Impulsmessverfahren

Das Impulsmessverfahrens basiert auf der Messung der Laufzeit t eines Laserimpulses, der vom Sender zum Reflektor und wieder zurück zum Empfänger läuft (s. Abb. 6-2). Daraus kann über die Gleichung

$$D = \frac{c_0}{2n} \cdot t \quad \text{mit } c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum} \quad (\text{Gl. 6-3})$$

$$n = \text{Brechungsindex der Atmosphäre}$$

direkt die gesuchte Distanz D abgeleitet werden. Die Laufzeitmessung erfolgt mit Hilfe eines elektronischen Zählers, der beim Aussenden des Impulses durch einen direkt auf den Empfänger gelenkten Teil des Impulses gestartet und durch den Empfang des reflektierten Impulses gestoppt wird. Auf Grund der hohen Lichtgeschwindigkeit werden sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an die Laufzeitmessung gestellt, und zwar unabhängig von der Länge der zu messenden Strecke. So entspricht eine Genauigkeit der Laufzeit von 1 ns einer Streckengenauigkeit von $\sim 0,15$ m. Die hierfür eingesetzten Verfahren der analog-digitalen oder der rein digitalen Zeitmessungen sind ausführlich in [DEUMLICH, STAIGER 2002] oder [RÜEGER 1996] beschrieben. Der EDM im LaserAce 300 arbeitet mit Lichtwellen aus dem nahen Infrarot und zeichnet sich durch die in Tabelle 6-2 aufgeführten Parameter aus.

Lasertyp	GaAs Laser Diode 905nm
Schutzklasse	Klasse 1 CENELEC EN60825-1/FDA
Reichweite	reflektorlos bis zu 300 m, mit Reflektor bis 5 km
Genauigkeit	10 cm typisch
Auflösung	1 cm
Messdauer	0,3 sec.

Tabelle 6-2: EDM LaserAce 300 [MDL 2001]

Nach [MÖSER et al. 2000] liegen die Vorteile des Impulsmessverfahrens in

- ☞ den eindeutigen Streckenmessergebnissen mit hoher Auflösung innerhalb kurzer Zeit,
- ☞ der größeren Reichweite und
- ☞ der Möglichkeit auf Grund der energiereichen Impulse, eine Streckenmessung ohne besondere Reflektoren (unzugängliche Objekte) durchführen zu können.

Die Reichweite und Genauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung hängt erheblich von der angemessenen Oberfläche, den meteorologischen Bedingungen sowie den instrumentellen Fehlereinflüssen ab. Die wesentlichen Einflussfaktoren hierbei sind:

- ☞ Fehler in der Quarzfrequenz (Genauigkeit Laufzeitmessung)
- ☞ Auflösungsvermögen (eindeutige Impulsform für zuverlässige Detektion gefordert)
- ☞ Nullpunktkorrektur (Messsensor - Reflektor)
- ☞ Atmosphäre (Refraktion, aktuelle Ausbreitungsgeschwindigkeit)
- ☞ Zielpunkte im Schatten
- ☞ Farbe, Oberflächenstruktur und Rauigkeit
- ☞ Lage und Form der Zielpunktfläche (fehlerhafte Distanzmessung auf gedrehte, geneigte oder unebene Zielflächen wie z. B. Kanten)
- ☞ Größe des Zieles mind. so groß (oder größer) wie der Durchmesser Strahlkegel (s. Tabelle 6-3)
- ☞ reflektierende Gegenstände im Zielstrahl



Abbildung 6-3: Brush Filter LaserAce 300

Distanz	Durchmesser
100m	40cm
200m	80cm
300m	120cm

Tabelle 6-3: Durchmesser Strahlkegel vs. Entfernung



Abbildung 6-4: Fotostativ

Somit ergibt sich nach [JOECKEL, STOBBER 1995] unter Berücksichtigung der instrumentellen Fehlergrößen die gesuchte Distanz zu

$$D = \frac{c_0}{2n_a} \cdot t_l + k_0 \quad \text{mit } n_a = \text{aktueller Brechungsindex} \quad (\text{Gl. 6-4})$$

t_l = korrekte Laufzeit
 k_0 = Nullpunktkorrektur

Da der erste, ausreichend stark reflektierte Impuls gemessen wird, stellt vor allem die Anfälligkeit gegenüber Hindernissen im Messstrahl aus praktischer Sicht ein großes Problem dar. Diese Situation kommt im Wald relativ häufig vor (Blätter, Äste), so dass sich die Verwendung des in Abbildung 6-3 dargestellten „brush filter“ empfiehlt (Fa. MDL). Dabei handelt es sich um eine spezielle, aufsteckbare Linse, die in Verbindung mit einem handelsüblichen Prisma oder Retroreflektor eingesetzt werden kann. Der Filter lässt bei dem zurückkommenden Messsignal nur die von dem Prisma/Reflektor zurückgeworfenen, eindeutigen Messimpulse durch, Streusignale werden abgewiesen.

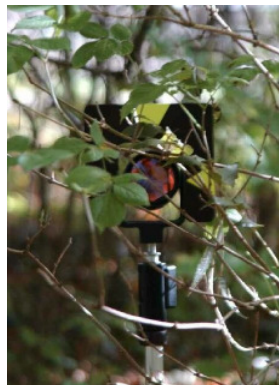


Abbildung 6-5: Prismatest

Testmessungen mit dem LaserAce 300 auf einem Alu-Fotostativ in Kombination mit einem Leica Rundprisma bestätigten die Praxistauglichkeit der Technik auf Sollstrecken von 10 – 50 m (s. Abb. 6-4 und Abb. 6-5). Selbst bei Messungen durch dichten Bewuchs lieferte der Sensor entweder eine der Messgenauigkeit von ≤ 10 cm entsprechende Distanz oder gar keinen Messwert, was im Sinne der Zuverlässigkeit positiv zu bewerten ist. Dabei hat sich eine Mehrfachanzielung von **mindestens drei Anzielungen** und eine **maximale Zielweite von 50 m** für eine korrekte Anzielung diese Art des Prismas bewährt. Der einzige Nachteil ist, dass bei Verwendung des Filters die Möglichkeit der berührungslosen Streckenmessung verloren geht, so dass ein 2. Mann für die Messungen als Reflektorträger notwendig wird. Allerdings kann der Filter auch jederzeit schnell vom Gerät für eine berührungslose Messung abgesteckt werden.

6.1.3. Elektronische Neigungsmessung

Für die korrekte Bestimmung des magnetischen Azimuts μ aus den parallel zur Erdoberfläche verlaufenden Komponenten H_x und H_y des Erdmagnetfeldes ist die Lage des Sensors gegenüber der Horizontal Ebene mit Hilfe der Orientierungswinkel ϕ und θ zu berücksichtigen (s. Abb. 6-6). Des Weiteren ist für die Ermittlung der Horizontalstrecke und die Ableitung des Höhenunterschiedes zwischen Steh- und Zielachse die Kenntnis des Vertikal- oder Höhenwinkels erforderlich. Letzterer ist durch den Strahl zum Zielpunkt und seiner Projektion auf die durch den Standpunkt gelegte Horizontalebene als Schenkel definiert und wird beim LA300, ebenso wie die Orientierungswinkel, über einen integrierten Beschleunigungssensor (Accelerometer) erfasst. Die Leistungsfähigkeit eines Accelerometers hängt im Wesentlichen vom Einfluss der Temperatur, mechanischen Ungenauigkeiten und der Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen ab, die nicht entlang der Sensorachse wirken [HOFMANN-WELLENHOF et al. 2003]. Bis auf die in Tabelle 6-4 aufgeführten Merkmale wurden von MDL keine weiteren Details zu dem im LA300 eingesetzten Sensor mitgeteilt, so dass auf eine detailliertere Darstellung verzichtet werden muss.

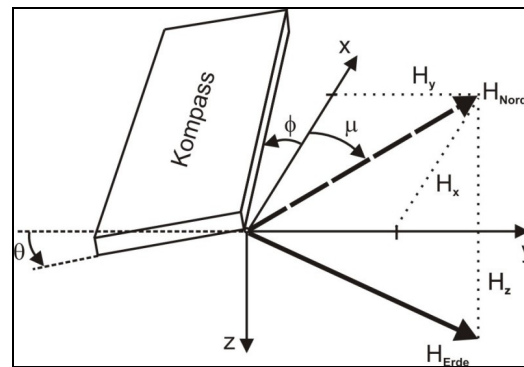


Abbildung 6-6: Einfluss Neigung auf Azimutmessung

Typ	Accelerometer
Messbereich	-90° bis +90°
Genauigkeit	0,3° bei 0° Neigung
Auflösung	0,1°

Tabelle 6-4: Inclinometer LaserAce 300 [MDL 2001]

6.2. Genauigkeits- und zuverlässigkeitsrelevante Aspekte der Positionierung mit handgetragenem 3D-Polarsensor

Neben den die drei Beobachtungsgrößen Richtung, Strecke und Neigung betreffenden Einflussfaktoren haben noch dem jeweiligen Mess- und Berechnungsverfahren spezifische Faktoren einen Einfluss auf die Genauigkeit, Zuverlässigkeit sowie die Praktikabilität (und damit Wirtschaftlichkeit) des gesamten Messverfahrens. In diesem Kapitel wird daher ein Überblick über alle relevanten Größen bzw. Methoden gegeben, die bestehenden Abhängigkeiten aufgezeigt sowie eine praxistaugliche Lösung für eine ausreichend genaue Standpunktzentrierung des handgetragenen Sensors vorgestellt.

6.2.1. Auswirkungen instrumenteller und verfahrenstechnischer Einflussfaktoren

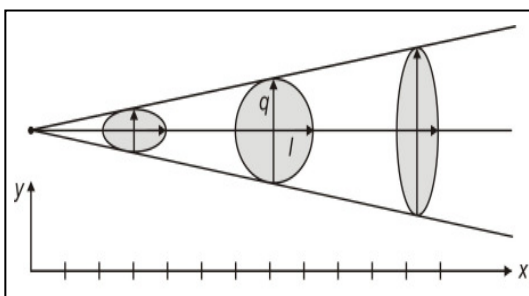


Abbildung 6-7: Längs- und Querabweichung

Wie bei der Tachymetrie lassen sich die 2D-Genauigkeitsmaße für einen mit einem handgetragenem 3D-Polarsensor aufgenommenen Punkt aufteilen in ein Maß parallel zur Zielrichtung (Längsabweichung l) und eines senkrecht dazu (Querabweichung q). Die Längsabweichung ist hierbei ein Resultat der Genauigkeit der Streckenmessung, die Querabweichung der Winkelmessung. In der Praxis ist es sinnvoll, wenn für die gewöhnliche Punktentfernung die Strecken- und Winkelgenauigkeit die gleiche Größenordnung aufweisen, um eine annähernd kreisförmige Fehlerfigur für die Messpunkte zu erhalten (s. Abb. 6-7). Punkte, die wesentlich näher oder weiter entfernt sind, sowie die Kombination von Sensoren mit unterschiedlichen Genauigkeiten weisen eine zu einer Ellipse deformierte Fehlerfigur auf. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung hängt von den Unsicherheiten in der Vertikal- oder Höhenwinkelbestimmung sowie der Streckenmessung ab. Darüber hinaus haben noch verfahrenstechnische Faktoren Auswirkung auf die 3D-Punktgenauigkeit, wie folgender zusammenfassender Überblick aufzeigt.

☞ **Richtungsunsicherheit dt**
Die Unsicherheit in der Richtung ergibt sich aus der interne Messgenauigkeit, der korrekten Bestimmung der Störgröße $d\mu$ sowie der Genauigkeit der Objektanzielung und der zentrischen Positionierung des handgetragenen 3D-Polarsensors über dem Bodenpunkt. Die Richtungsverzerrung der Gaußschen Abbildung ist im NP Bayerischer Wald so gering, dass sie vernachlässigt werden kann ($\sim 0,01''$ bei $s = 1$ km).

Geht man davon aus, dass der Störeinfluss $d\mu$ nicht vollständig durch die geräteinterne Kalibrierung eliminiert wird sowie eine (wenn auch kleine) Abweichung $d\delta$ in der Deklination vorliegt, dann ergibt sich der in der Abbildung 6-8 dargestellte Richtungsfehler dt . Schätzt man die Lagegenauigkeit in Bezug auf diesen Richtungsfehler ab, dann zeigt sich, dass für eine angestrebte horizontale Punktgenauigkeit von ± 1 m bei einer Messdistanz s von 50 m eine Richtungsgenauigkeit von mind. 1° notwendig ist (s. Tabelle 6-5), vorausgesetzt andere Fehlereinflüsse können vernachlässigt werden. Bei größeren Zielweiten ist bei dieser Richtungsgenauigkeit mit der in Tabelle 6-6 aufgeführten Querabweichungen zu rechnen.

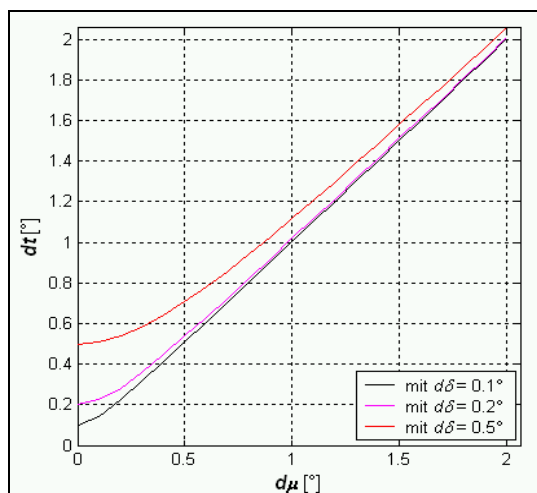


Abbildung 6-8: Abschätzung Richtungsfehler

dt	s	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m
$0,5^\circ$		0,09	0,17	0,26	0,35	0,44
1°		0,17	0,35	0,52	0,70	0,87
2°		0,35	0,70	1,05	1,40	1,74
3°		0,52	1,05	1,57	2,09	2,62

Tabelle 6-5: Querabweichung [m] bei variablem s und dt

Distanz [m]	Querabweichung bei 1° Richtungsfehler [m]
50	0,87
100	1,74
200	3,49
300	5,24

Tabelle 6-6: Querabweichung bei festem dt und variablem s

☞ Streckenunsicherheit ds

Wie bereits in Kapitel 6.2.1 erläutert, hängt die Reichweite und Genauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung von verschiedenen Einflussfaktoren ab, so dass eine gemessene Entfernung D auch als Funktion $D = f(D, \alpha, M, SR, \lambda, n, t)$ dargestellt werden kann (s. Abb. 6-9). Hinzu kommen Fehler durch Fehlmessungen (Hindernisse), ungenaue Objektanzielung sowie eine unzureichende Zentrierung des Sensors über dem Bodenpunkt. Die Distanz D stellt den Messwert einschliesslich der erforderlichen Korrekturen dar und wird durch Addition von geometrischen Reduktionen in die Strecke S auf dem Geoid bzw. Bezugsellipsoid überführt. Unter Berücksichtigung der Gleichung 6-4 ergibt sich die korrigierte Distanz somit zu

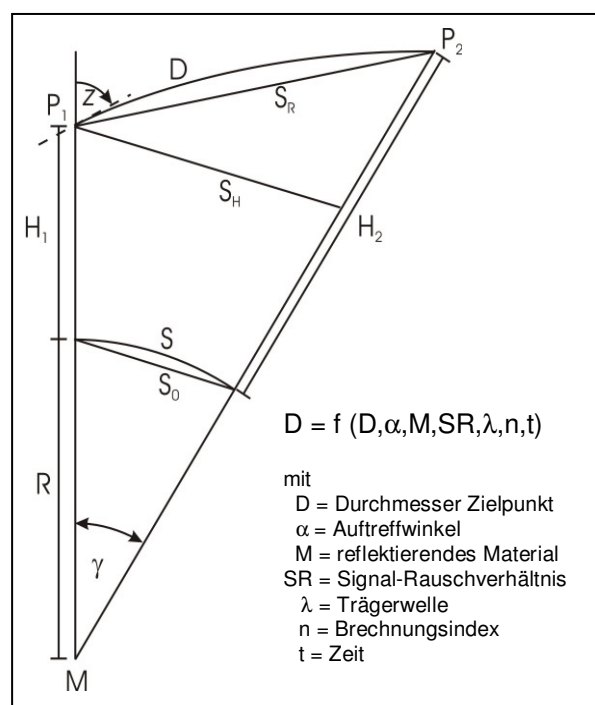


Abbildung 6-9: Streckenreduktionen

$$D = D_a + k_n + k_0 + k_z \quad (\text{Gl. 6-5})$$

mit D_a = abgelesene Distanz
 k_n = Geschwindigkeitskorrektur
 k_0 = Nullpunktskorrektur
 k_z = Korrektur Zentrierung

und die reduzierte Strecke S bei $S_0 < 5$ km zu

$$S = S_0 = \sqrt{(S_R^2 - (H_2 - H_1)^2)} \cdot \left(1 - \left(\frac{H_m}{R}\right)\right)$$

$$= S_H \cdot \left(1 - \left(\frac{H_m}{R}\right)\right) \quad (\text{Gl. 6-6})$$

mit $S_R = D$ bei < 10 km
 S_H = Horizontalsztrecke im mittleren Messhorizont
 H_1 = Höhe Standpunkt über Bezugsfläche
 H_2 = Höhe Zielpunkt über Bezugsfläche
 H_m = mittlere Höhe über Bezugsfläche
 R = Radius der Schmiegekuugel im Mittelpunkt M

Auf Grund der geringen Zielweiten beim freihändigen Einsatz eines 3D-Polarsensors sind bis auf die Zentrierung alle Korrekturen und Reduktionen vernachlässigbar, wie die nachfolgende Tabelle 6-7 zeigt. Auch die streckenunabhängige Nullpunktskorrektur, die eine mögliche Differenz zwischen dem elektronischen und mechanischen Nullpunkt im Messsensor bzw. im verwendeten Reflektor korregieren soll, ist bei der Verwendung des LaserAce300 nicht notwendig. Bei Vergleichsmessungen im Messlabor des Lehrstuhls für Geodäsie an der TU München und auf Referenzstrecken in der Natur konnten die Strecken unter Verwendung eines Alu-Fotostativs mit einer Standardabweichung von ± 5 cm bestimmt werden und wiesen keine systematischen Abweichungen in den Messergebnissen bei der Verwendung unterschiedlicher Prismen oder Zieltafeln auf (Leica und Zeiss Rundprismen, weiße Plastiktafel).

Geschwindigkeitskorrektur	Höhenreduktion	Streckenreduktion Gauss-Krüger	Zentrierung
$k_n \sim D_a \cdot (n_0 - n)$ [MÖSER et. al 2000] mit n_0 = Brechnungsindex Bezugsatmosphäre n = Brechnungsindex aktuelle Atmosphäre D_a = abgelesene Distanz	s. Gl. 6-6	s. Gl. 2-1	s. Gl. 6-10
Für eine Differenz in der Temperatur von 12° und im Luftdruck von 80 hPa zur Bezugsatmosphäre im Gerät ergibt sich unter Verwendung der IUGG-(International Union of Geodesy and Geophysics) Formeln für n ein k_n von 34 ppm (= 0,2 mm bei 50 m).	Bayerischer Wald: 600 m = 0,5 cm 1400 m = 1 cm	Bayerischer Wald: ~ 100 km vom Hauptmeridian entfernt ergibt 6 mm Streckenreduktion	Standpunktzentrierung ist zu berücksichtigen, Zielpunktzentr. i. d. R. ausreichend genau

Tabelle 6-7: Abschätzung relevanter Streckenkorrekturen und – reduktionen für $s = 50$ m

Neben der Reduktion mit gegebenen Punkthöhen kann die Strecke mit der folgenden Formel auch über den gemessenen Vertikalwinkel und bekannter Standpunktshöhe reduziert werden [SCHNÄDELBACH 1996].

$$S = S_R \cdot \sin z \cdot \left(1 - \frac{1}{R} \cdot \left(H_2 - \frac{1}{2} S_R k \cos z \right) \right) = S_H \cdot \left(1 - \frac{1}{R} \cdot \left(H_2 - \frac{1}{2} S_R k \cos z \right) \right) \quad (\text{Gl. 6-7})$$

- mit $S_R = D$ bei < 10 km
- S_H = Horizontalstrecke im mittleren Messhorizont
- H_2 = Höhe Zielpunkt über Bezugsfläche = $H_1 + S_R \cdot \sin z$
- z = Vertikalwinkel in P_1
- R = Radius der Schmiegekugel im Mittelpunkt M
- k = Refraktionskoeffizient

Da für eine Distanzmessung unter 2 km und ohne große Höhenunterschiede (< 50 m) der Refraktionskoeffizient vernachlässigbar ist, ergibt sich in diesem Fall die reduzierte Strecke zu

$$S = S_R \cdot \sin z \cdot \left(1 - \frac{H_2}{R} \right). \quad (\text{Gl. 6-8})$$

☞ **Neigungsunsicherheit dz**

Analysiert man Gl. 6-8 mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes, so kann unter Vernachlässigung von Erdkrümmung, Refraktion und Reduktion auf die Bezugsfläche die Reduktionsgenauigkeit dS in Abhängigkeit vom Höhenunterschied und der Vertikalwinkelgenauigkeit abgeschätzt werden (Gl. 6-9). Daraus ergibt sich für den bei einer Zielweite von 50 m maximal (sinnvoll) messbaren Höhenunterschied von 20 m und einer angestrebten Reduktionsgenauigkeit von 10 cm eine Genauigkeit des Vertikalwinkels von $0,3^\circ$. Je geringer der Höhenunterschied und die Anforderungen an die Reduktionsgenauigkeit sind, desto geringer werden auch die Genauigkeitsanforderungen an den Vertikalwinkel (s. Tabelle 6-8).

$$\begin{aligned}
 S &= S_R \cdot \sin z \\
 dS &= S_R \cdot \cos z \cdot dz \\
 dS &= \Delta H dz \\
 \lg(dS) &= \lg(dH) + \lg(dz) \quad (\text{Gl. 6-9})
 \end{aligned}$$

dS \ dH	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm
1 m	2,9°	5,7°	11,5°	28,6°
5 m	0,6°	1,1°	2,3°	5,7°
10 m	0,3	0,6°	1,1°	2,9°
20 m	0,1°	0,3°	0,6°	1,4°

Tabelle 6-8: Abschätzung dz mit dH und dS

Die Größe der Neigungsunsicherheit ergibt sich bei einer Freihand-Messung mit dem Laser Ace 300 aus der internen Messgenauigkeit des Inklinometers (s. Tabelle 6-4) sowie der Genauigkeit mit der ein Objektpunkt angezielt und die Instrumentenhöhe bei der Messung bestimmt wird. Vor allem Letzteres ist in der Praxis bestenfalls auf ± 5 cm genau einzuhalten, da man bei dem Versuch, das Gerät zentrisch über dem Bodenpunkt zu positionieren, unterschiedlich weit in die Hocke geht. Schätzt man die Auswirkung einer um 10 cm veränderten Instrumentenhöhe bei einem in 30 m Entfernung und 3 m höher gelegenen Ziel ab, dann ergibt sich eine Unsicherheit in der Neigungsmessung von $0,1^\circ$, was der Auflösung des Neigungssensors entspricht. Der Einfluss einer exzentrischen Position des Sensors durch eine Verkippung des Oberkörpers während der Messung zur Seite oder nach vorne ist ebenfalls vernachlässigbar. So wird beispielsweise eine (typische) Instrumentenhöhe von 1,60 m bei einem um 10° zur Seite geneigten Oberkörper nur um 2,4 cm reduziert, wodurch sich der Höhenwinkel lediglich um $0,045^\circ$ ändert.

☞ Objektanzielung und Zentrierung

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit der ein Objekt mit Hilfe eines 3D-Polarsensors angezielt werden kann, hängt im Wesentlichen von den folgenden Kriterien ab:

- ☞ *Art des optischen Zielpunktes im Fernrohr:* Fadenkreuz und/oder roter Laserpunkt
- ☞ *Optik Zielfernrohr:* Objektiv / Okular fokussierbar bzw. nicht fokussierbar, Brennweite
- ☞ *Oberflächeneigenschaften, Größe und Form des Zielpunktes:* z. B. Rundprisma, Plastikscheibe, Zieltafel oder bestimmtes Geo-Objekt (Baum, Boden, Haus, etc.)
- ☞ *Entfernung zum Zielpunkt*
- ☞ *Stand- und Zielpunktzentrierung:* freihändig, Lotstock / Stativ

Bei der Zielpunktzentrierung ist nur eine geringe Unsicherheit zu erwarten, da bei der Verwendung von Prismen oder Zieltafeln in der Regel Lotstöcke mit Dosenlibellen zur Horizontierung eingesetzt werden. Diese stellen bei sorgfältiger Handhabung eine Zentriergenauigkeit von $< 1-2$ cm sicher. Demgegenüber kann die Art der Standpunktzentrierung einen maßgeblichen Einfluss auf die erreichbare Qualität der Messungen und vor allem auf den für die Applikation optimalen Messablauf haben. In Tabelle 6-9 wurden einige der hierbei relevanten Aspekte zusammengestellt und bewertet. Diese Übersicht zeigt, dass sich das angestrebte Genauigkeitsniveau umgekehrt proportional zur Ergonomie der Ausrüstung verhält. Der Anwender muss daher immer abhängig von den applikationsspezifischen Anforderungen diese Aspekte untereinander abwägen, um die für ihn optimale Systemlösung zu bekommen.

Standpunkt-zentr. Kriterien	freihändig		Gerät montiert	
	ohne Hilfsmittel	Senkel	Lotstock	Stativ
Anzielungs- / Messgenauigkeit	gering, da „Unsicherheiten“ in der Anzielung und nur grobe Zentrierung	nicht praxistauglich, da zu unruhig durch Bewegungen oder Wind	hoch, da relativ ruhige Anzielung und geringe Exzentrizität. Optionaler Einsatz von Winkelencodern möglich	sehr hoch, da sehr ruhige Anzielung und zentrische Aufstellung. Optionaler Einsatz von Winkelencodern möglich
Störeinflüsse auf Elektronik	gering, da weniger störende Einzelkomponenten	gering, da weniger störende Einzelkomponenten	gering, wenn nicht-störende Materialien	gering, wenn nicht-störende Materialien
Ergonomie	hoch, da wenig Einzelkomponenten	hoch-mittel, da wenig Einzelkomponenten, aber schwierige Bedienung	gering, da zusätzliche Einzelkomponenten (Gewicht, Größe, Energie)	gering, da zusätzliche Einzelkomponenten (Gewicht, Größe, Energie)

Tabelle 6-9: Aspekte der Objektanzielung und Standpunktzentrierung mit 3D-Polarsensoren

Im Fall des HTO-Projektes 33-2 ergab die Anforderungsanalyse der Zielapplikationen in Kapitel 4 auf Grund der schwierigen Geländebedingungen einen freihändigen Einsatz für den 3D-Polarsensor in SmobGIS. Die hierdurch verursachte Unsicherheit in der Standpunktzentrierung kann bis zu 0,4 m betragen (s. Kap. 6.2.2). Des Weiteren haben die praktische Erfahrungen gezeigt, dass eine freihändige Anzielung nur bis max. 50 m zuverlässig möglich ist, da der LaserAce 300 über kein fokussierbares Fernrohr mit Fadenkreuz verfügt, so dass ein Ziel hinter dem eingeblendeten Laserpunkt „verschwindet“. Außerdem gibt der Bewuchs meistens die maximale Sichtweite vor. So hat sich bei Testmessungen eine mittlere Zielweite von 32 m auf einem Forstweg und 17 m in unterschiedlichen Bestandstypen unter Verwendung eines Leica- Rundprismas mit Zieltafel auf einem Lotstock als Zielpunkt ergeben (s. auch Kap. 6.3.2.2).

6.2.2. Zentrierhilfe *OptoLot*



Abbildung 6-10: *OptoLot* LaserAce 300

Bei der freihändigen Objektanziehung mit einem 3D-Polarsensor muss der Beobachter versuchen, gleichzeitig möglichst genau den Zielpunkt anzuzielen und den Sensor zentrisch über dem Bodenpunkt zu halten. In der Praxis kann sich dadurch in folgenden Situationen eine Exzentrizität im Standpunkt ergeben:

1. bei einer annähernd lotrechten, aber exzentrischen Aufstellung in Bezug auf einen Sensorferenzpunkt. Dies trifft z. B. dann zu, wenn der Beobachter direkt auf dem Bodenpunkt steht (s. Abb. 6-11 links).
2. bei einer (unbewussten) Verdrehung oder Verkipfung zur Seite bzw. nach vorne, um das Objekt besser anzielen zu können (s. Abb. 6-11 Mitte und rechts).

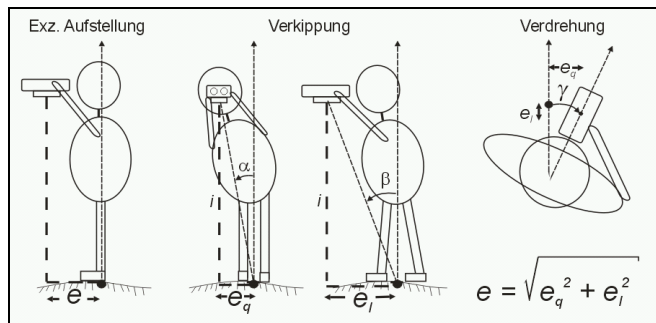


Abbildung 6-11: Ursachen für Standpunktexzentrizität e

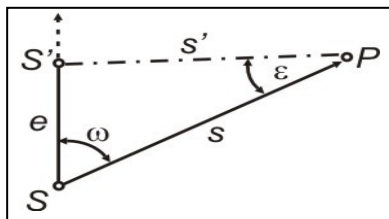


Abbildung 6-12: Richtungseinfluss von e

$$\epsilon = \frac{e}{s} \cdot \rho \tag{Gl. 6-10}$$

mit S = Standpunktzentrum
 S' = Standpunktexzentrum
 e = Lineare Exzentrizität
 ϵ = Exzentrizität
 s, s' = Entfernungen Zielpunkt

Schätzt man die Größenordnung einer durch Verkipfung verursachten Standpunktexzentrizität ab (s. Tab. 6-10) und ermittelt über die Gl. 6-10 den Einfluss auf eine mit dem 3D-Polarsensor gemessenen Richtung (s. Tab. 6-11), dann zeigt sich die Bedeutung einer ausreichend genauen Zentrierung beim freihändigen Einsatz. Außerdem wird der Messablauf verzögert, wenn der Beobachter bei jeder Anzielung eine möglichst geringe Exzentrizität durch ständigen Wechsel zwischen Objektanziehung und Kontrolle der Sensorposition bzgl. des Bodenpunkts ohne Hilfsmittel sicherstellen will. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Prüflabor an der TU München eine spezielle Vorrichtung mit einem optischen Lot für den LaserAce 300 entwickelt. Das sog. *OptoLot* ist frei schwingend, so dass es automatisch durch die Schwerkraft in der Vertikalen gehalten wird und ermöglicht gleichzeitig eine Visur zum Zielpunkt und die Kontrolle der zentrischen Aufstellung über dem Bodenpunkt (s. Abb. 6-10). Über einen Umlenkspiegel ist für den Beobachter das „Bodendenbild“ auch bei steilen Visuren sichtbar und somit eine ausreichend zentrische Aufstellung über dem Punkt gewährleistet. Umfangreiche Testmessungen bestätigen die Praxistauglichkeit des Verfahrens, das neben der Verbesserung der Zentrierengenauigkeit auch den Messablauf praktabler und damit wirtschaftlicher gestaltet. Die in Abb. 6-10 dargestellte Exzentrizität e_{OL} zwischen dem *OptoLot* und dem Sensorreferenzpunkt (Schraube) wird hierbei rechnerisch korrigiert.

α [°]	1	5	10	5	10	10
β [°]	1	1	1	5	5	10
e [m]	0.04	0.14	0.28	0.20	0.31	0.39

Tabelle 6-10: Abschätzung Standpunktexzentrizität e

e [m]	0.1	0.2	0.4			
s [m]	10	50	10	50	10	50
ϵ [°]	0.57	0.11	1.14	0.23	2.3	0.46

Tabelle 6-11: Einfluss von e auf Richtungsmessung

6.3. Konventionelle Messverfahren

Bevor in Kapitel 6.4 ein neues Positionierungsverfahren für einen 3D-Polarsensor vorgestellt wird, soll an dieser Stelle das Potential des LA300 in konventionellen Messverfahren aufgezeigt werden. Hierfür wurden im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 6-12 aufgelisteten Zusatzmodule für die mobile GIS Applikationssoftware ArcPad in Form von sog. Applets entwickelt. Eine ausführliche Beschreibung der Module findet sich in [CZAJA 2003a,b,d], diverse Anwendungsbeispiele zeigt Kapitel 7.

Applet	Funktionsbeschreibung
LRF Vers. 3.0	3D-Einzelunkt, -Linien und Flächenbestimmung mit Laser Ace 300 inkl. Layer- und Messdatenverwaltung sowie Protokolldatei
LRF_iPaq Vers. 1.2	Auf Windows PocketPC Displayauflösung (320 x 240 Pixel) abgestimmtes LRF-Applet für die polare 3D-Punkt, -Linien und Flächeneinmessung mit Laser Ace 300 (s. LRF-Applet)
LRF 3Dpoly_PolAnh Vers. 2.5	Einseitiger 3D-Polarzug mit LaserAce 300 inkl. Zwischenblick-Funktion, Layer- und Messdatenverwaltung, Protokollierung sowie Visualisierung temporärer Standpunkte (Orientierung).
LRF 3D-Poly Vers. 2.1	3D-Polarzug mit LaserAce 300 inkl. Zwischenblick-Funktion, Layer- und Messdatenverwaltung, Protokollierung, Visualisierung temporärer Standpunkte (Orientierung) und Fehlerabgleich mit Koordinatenverbesserung.
TCR Vers. 3.4	3D-Einzelpunkt, -Linien und Flächenbestimmung mit TCR 307 inkl. Layer- und Messdatenverwaltung, Protokoll, Standpunktorientierung sowie freier Stationierung. Zusätzliche Funktion „Liegender Baum“ zur automatischen Erzeugung liegender Bäumen als Polygonobjekt (DbFL).

Tabelle 6-12: Überblick der entwickelten ArcPad-Sensormodule

6.3.1. Terrestrische dreidimensionale Einzelpunktbestimmung

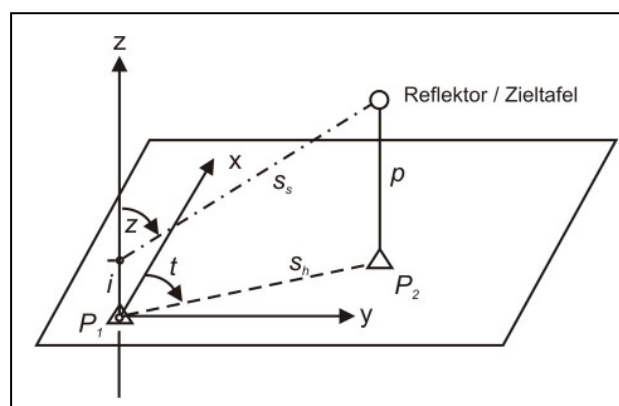


Abbildung 6-13: Terrestrische 3D-Punktbestimmung

Die Aufgabe einer terrestrischen dreidimensionalen Punktbestimmung ist es, sowohl die Lage- als auch die Höhenkomponente eines anvisierten Zielpunktes von einem koordinativ bekannten Standpunkt aus zu bestimmen. Im Fall eines ebenen, rechtwinkligen und linksorientierten Koordinatensystems (z. B. amtliches GK-Koordinatensystem Bayern) sowie der aktuellen Lotrichtung als Höhenbezugslinie kann die Berechnung getrennt nach Lage und Höhe mittels 1. geodätischer Hauptaufgabe und einer trigonometrischen Höhenübertragung erfolgen. Die notwendigen Beobachtungsgrößen sind der Richtungswinkel t , die Schrägstrecke s_s und der Zenitwinkel z sowie die daraus ab-

leitbare Horizontaldistanz s_h zum Zielpunkt (s. Abb. 6-13). Außerdem sind für eine korrekte Höhenbestimmung die Instrumentenhöhe i im Standpunkt und ein evtl. vorhandener Offset p des Zielpunktes über dem Bodenpunkt zu berücksichtigen. Die Formeln für die 1. Geodätische Hauptaufgabe lauten:

$$\begin{aligned} \Delta y &= s_h \cdot \sin t && \text{mit korrigierter und reduzierter Richtung } t \text{ und} && \text{(Gl. 6-11)} \\ \Delta x &= s_h \cdot \cos t && \text{Horizontaldistanz } s_h \text{ im jeweiligen Abbildungssystem} \end{aligned}$$

Für die trigonometrische Höhenübertragung aus einseitiger Bestimmung des Zenitwinkels z gilt folgende allgemeingültige Beziehung:

$$\Delta H = s_s \cdot \cos z + \underbrace{\frac{s_s^2}{2r} \cdot (1-k) \cdot \sin^2 z}_{v_{ER}} + i - p \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} r &= \text{Erdradius} \\ k &= \text{Refraktionskoeffizient} \\ s_s &= \text{Schrägstrecke} \\ i, p &= \text{Instrumenten-, Zielpunkthöhe} \end{aligned} \quad \text{(Gl. 6-12)}$$

Das unter v_{ER} zusammengefasste Korrekturglied kann auf Grund der kurzen Zielweiten mit dem LA300 vernachlässigt werden. Somit ergeben sich die Lagekoordinaten und die Höhe des Zielpunktes zu

$$x_2 = x_1 + s_h \cdot \cos t \quad \text{(Gl. 6-13)}$$

$$y_2 = y_1 + s_h \cdot \sin t \quad \text{(Gl. 6-14)}$$

$$z_2 = z_1 + s_s \cdot \cos z + i - p = z_1 + s_h \cdot \cot z + i - p \quad \text{(Gl. 6-15)}$$

6.3.1.1. Fehlerabschätzung Einzelpunktbestimmung

Die Genauigkeit der ebenen Punktkoordinaten wird beeinflusst durch die Standardabweichungen σ der

- Koordinaten x, y des Standpunktes P_1 mit $\sigma_{P_1} = \sqrt{\sigma_{xP_1}^2 + \sigma_{yP_1}^2}$
- Strecke s zum Zielpunkt P mit σ_s
- Genauigkeit des Richtungswinkels t mit $\sigma_t = \sqrt{\sigma_\mu^2 + \sigma_\delta^2 + \sigma_c^2}$

Die zu erwartende Lagegenauigkeit des Zielpunktes P_2 ergibt sich durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Gl. 6-13 und 6-14 sowie unter Annahme eines fehlerfreien Standpunktes zu

$$\sigma_{P_2} = \sqrt{\sigma_{xP_2}^2 + \sigma_{yP_2}^2} = \sqrt{\sigma_s^2 + \left(\frac{s \cdot \sigma_t}{\rho}\right)^2} \tag{Gl. 6-16}$$

und stellt den *mittleren Punktfehler nach Helmert* dar [PELZER 1980]. Um die Abweichungen der Mess-elemente Strecke und Richtung in ihre Komponenten zu zerlegen, kann Gl. 6-16 in Bezug auf den Festpunkt als Längs- und Querabweichung angegeben werden. Hierbei wurde zusätzlich zu den zufälligen Abweichungen des Messverfahrens auch die Genauigkeit der Standpunktzentrierung σ_e berücksichtigt:

$$\sigma_{P_2} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_q^2} = \sqrt{\sigma_s^2 + \frac{s \cdot \sigma_t}{\rho} + \sigma_e^2} \tag{Gl. 6-17}$$

Will man die Genauigkeit des gemessenen Höhenunterschiedes zum Zielpunkt abschätzen, dann gilt es nach [MÖSER et al. 2000] den Einfluss

- der Distanzmessung mit $\sigma_{\Delta h_s} = \cot z \cdot \sigma_s$
- des Zenitwinkels mit $\sigma_{\Delta h_z} = \frac{s_h}{\sin^2 z \cdot \rho} \cdot \sigma_z$
- und der Instrumenten- und Zielpunkthöhe mit $\sigma_{\Delta h_{i-p}} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_p^2}$

zu berücksichtigen. Durch Zusammenfassung der Einzeleinflüsse ergibt sich der Gesamtfehler dann zu

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sigma_{\Delta h_s}^2 + \sigma_{\Delta h_z}^2 + \sigma_{\Delta h_{i-p}}^2} \tag{Gl. 6-18}$$

Die Abschätzung der zu erwartenden Lage- und Höhengenaugkeiten bei der terrestrischen Einzelpunktbestimmung mit dem 3D-Polarsensor LA300 in den Tabellen 6-13 und 6-14 zeigt, dass die Genauigkeit der Lage von der Qualität des Richtungswinkels t abhängt. Daher ist für eine geforderte Lagegenauigkeit von ± 1 m das magnetische Azimut auf unter 1° genau zu bestimmen, da weitere richtungsbeeinflussende Größen wie Deklination δ und Meridiankonvergenz c mit einer Genauigkeit von $\leq 0,1^\circ$ vorliegen. Demgegenüber ist mit einer für forstliche Anwendungen sehr hohen Höhengenaugkeit zu rechnen.

Mittlerer Punktfehler nach Helmert				
σ_s [m]	0,1	0,05	0,1	0,05
σ_t [°]	1	1	0,5	0,5
Distanz [m]	σ_p [m]			
10	0,27	0,25	0,16	0,13
25	0,63	0,62	0,32	0,31
50	1,24	1,24	0,63	0,62
Längs- und Querabweichung				
σ_s [m]	0,1	0,1	0,05	0,1
σ_t [°]	1	1	1	0,5
σ_e [m]	0,1	0,05	0,05	0,1
Distanz [m]	σ_l / σ_q [m]			
10	0,12 / 0,50	0,11 / 0,50	0,06 / 0,50	0,12 / 0,36
25	0,12 / 0,79	0,11 / 0,79	0,06 / 0,79	0,12 / 0,56
50	0,12 / 1,11	0,11 / 1,11	0,06 / 1,11	0,12 / 0,79

Tabelle 6-13: Abschätzung Lagefehler Einzelpunkt

Genauigkeit Höhenunterschied				
σ_s [m]	0,1	0,1	0,1	0,1
σ_z [°]	0,5	0,5	0,5	1
σ_i [m]	0,05	0,05	0,1	0,05
σ_p [m]	0,1	0,2	0,1	0,1
s= 10 m	$\sigma_{\Delta h}$ [m]			
z = 90	0,14	0,22	0,17	0,21
z = 80	0,14	0,22	0,17	0,21
z = 70	0,15	0,23	0,18	0,23
s= 25 m	$\sigma_{\Delta h}$ [m]			
z = 90	0,25	0,30	0,26	0,45
z = 80	0,25	0,31	0,27	0,46
z = 70	0,27	0,32	0,29	0,51
s= 50 m	$\sigma_{\Delta h}$ [m]			
z = 90	0,45	0,48	0,46	0,88
z = 80	0,46	0,50	0,47	0,91
z = 70	0,51	0,54	0,52	1,00

Tabelle 6-14: Abschätzung Höhengenaugkeit Einzelpunkt

6.3.1.2. Testmessungen Einzelpunktbestimmung

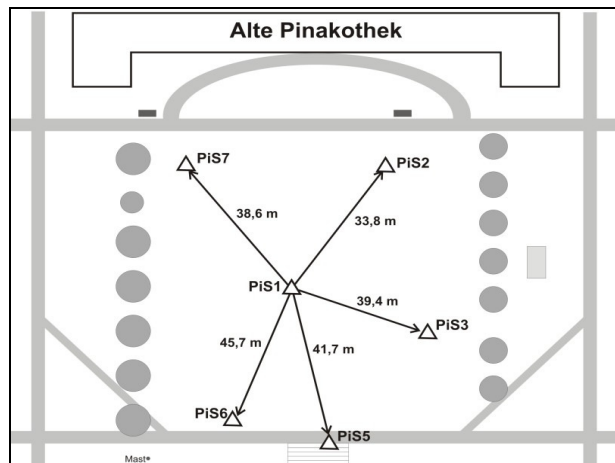


Abbildung 6-14: Testnetz Alte Pinakothek

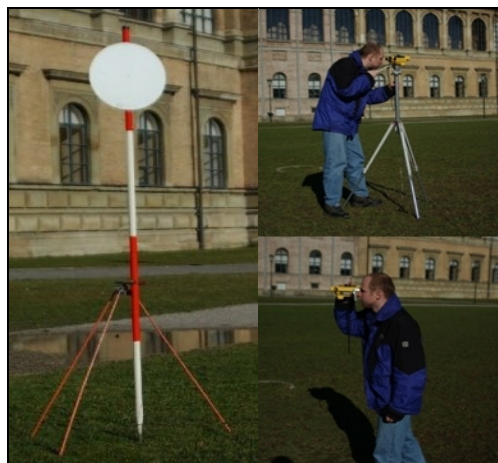


Abbildung 6-15: Einzelpunktbestimmung Testnetz

Um die Abschätzung und das Potential der Einzelpunktbestimmung in der Praxis zu überprüfen, wurden mehrere Vergleichsmessungen im Testnetz „Alte Pinakothek“ durchgeführt. Die Netzpunkte weisen eine gute Verteilung über den gesamten Horizont auf und bieten LA300 typische Zielweiten von < 50 m (s. Abb. 6-14). Zudem liegt das Testnetz auf einer großen Wiese, so dass nur mit sehr geringen Störeinflüssen auf den elektronischen Kompass zu rechnen war. Die Beobachtung der mit Zieltafeln ausgesteckten Netzpunkte erfolgte durch dreimaliges Anzielen mit dem auf einem Alu-Fotostativ montierten oder freihändig gehaltenem und mit dem OptoLot ausgerüstetem LA300 (s. Abb. 6-15). Dabei wurde der elektronische Kompass vor jeder Messung inklusiv dem Zubehör (Stativ, OptoLot) direkt vor Ort kalibriert.

Die Messergebnisse sind in der Abbildung 6-16 dargestellt und bestätigen die abgeschätzten Genauigkeiten. Vor allem zeigen sie, dass beim freihändigen Einsatz des LA300 auch ohne Anzielung von Referenzpunkten die geforderte Positionsgenauigkeit erreichbar ist, wenn die aktuell wirkenden Störeinflüsse durch die interne Kompasskalibrierung für den Zeitpunkt der Messung ausreichend genau erfasst sind. Die höheren Abweichungen beim Fotostativ können z. B. auf wechselnde Störeinflüsse durch metallische Kleinteile am Stativ (Schrauben, Nieten etc.) zurückgeführt werden. Eine Kontrolle durch die (in Forstgebieten fehlenden) Referenzpunkte würde hier die Zuverlässigkeit der Messung natürlich erhöhen.

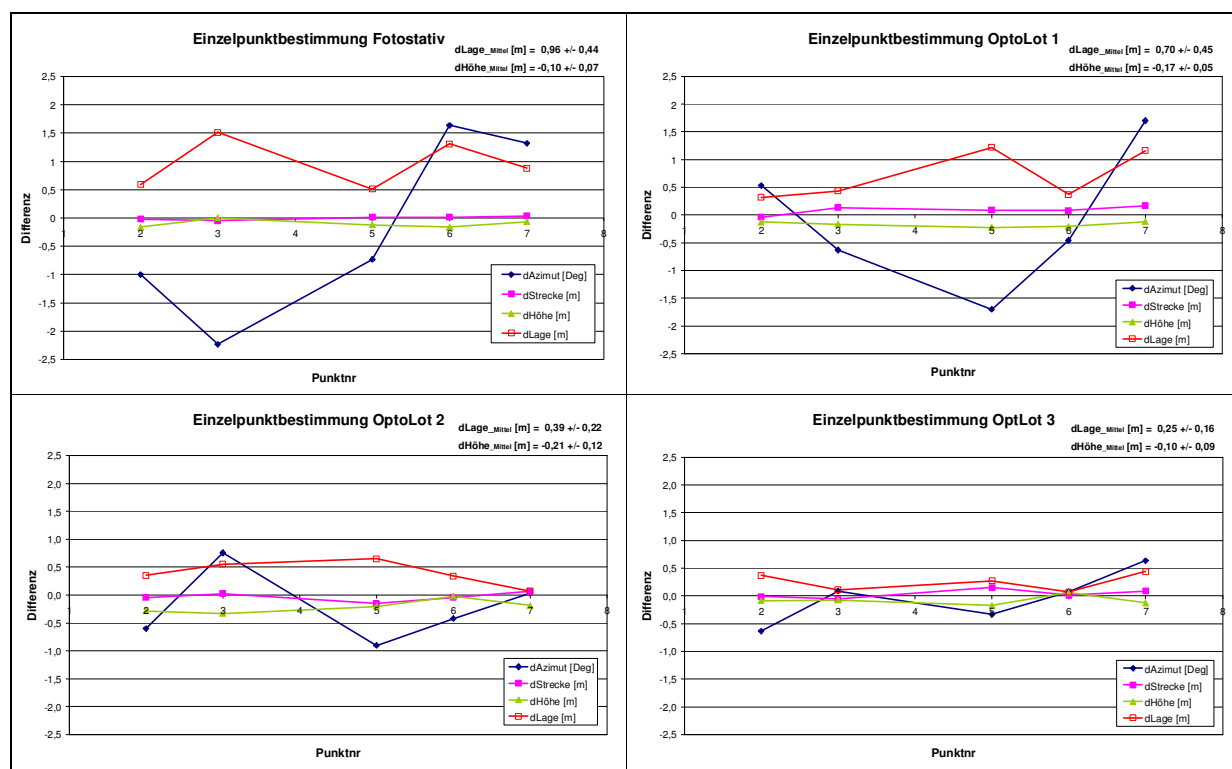


Abbildung 6-16: Messergebnisse Einzelpunktbestimmung LA300

6.3.2. 3D-Polarzug

Wie bereits in Kap. 4.6.1 erläutert, ist es auf Grund der sehr geringen Anzahl von Festpunkten in Forstgebieten sinnvoll, ein Messkonzept anzuwenden, bei dem mit Hilfe eines *Primärsensors* (GPS) durch eine von Referenzpunkten unabhängige Online-Positionierung weitestgehend die Festpunkte und diverse Objektpunkte bestimmt werden können. Dort wo eklatant schlechte Messbedingungen für GPS vorliegen, muss die Messung durch ein geeignetes Verfahren mit einem *Sekundärsensor* (3D-Polarsensor) weitergeführt werden, und zwar so lange bis wieder ein ausreichend genauer Festpunkt zur Verfügung steht (z. B. durch erneute GPS-Positionierung). Das Verfahren muss in Echtzeit erfolgen (visuelle Kontrolle / Orientierung) und parallel die Lage- und Höhenbestimmung von Objektpunkten (OP) ermöglichen. Nur durch eine solche gegenseitige Stützung von GPS und handgetragenem 3D-Polarsensor (absolute / relative Positionierung) ist das Ziel erreichbar, ein flexibles, tragbares, zuverlässiges und ausreichend genaues Positionierungssystem für die Navigation und Objekterfassung unter forstlichen Bedingungen zu realisieren.

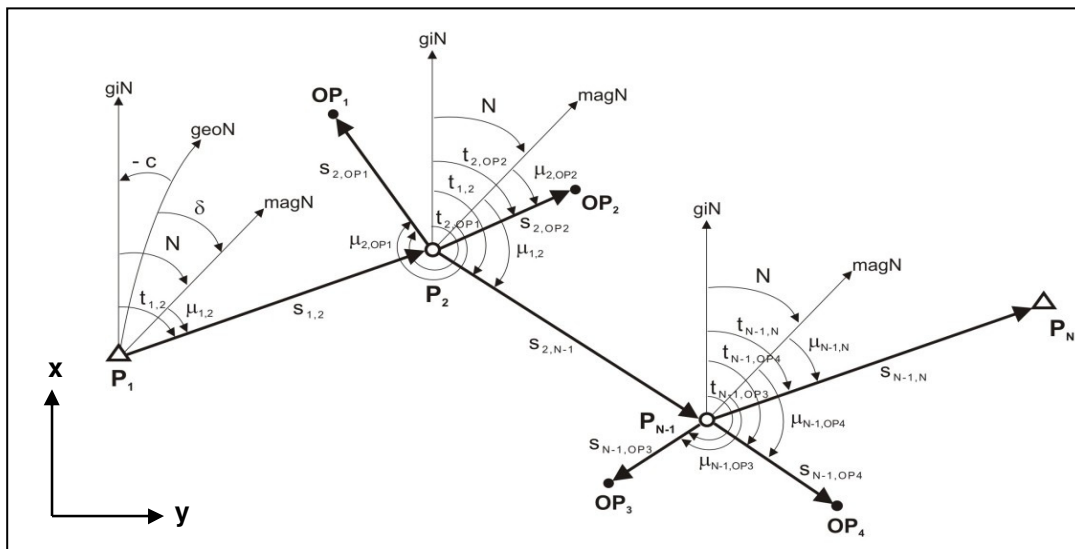


Abbildung 6-17: Beidseitig angeschlossener 3D-Polarzug (Lage)

Die o.g. verfahrenstechnischen Anforderungen an den Sekundärsensor werden durch das in der geodätischen Messtechnik aus der Vergangenheit bekannte Verfahren des *Bussolenzuges* bzw. des *Tachymeterzuges* erfüllt. Diese für analoge Messmittel wie Bussolen (magnetische Azimut) oder Reduktionstachymeter (Strecke, Höhenunterschied) entwickelten Verfahren sind ausführlich in der Fachliteratur beschrieben (z.B. in [VOLQUARDTS, MATTHEWS 1981], [WITTKKE 1971]), so dass hier nur die für SmobGIS relevanten Punkte erläutert werden. Um der Verwendung eines modernen (digitalen) 3D-Polarsensors mit unmittelbarer Lage und Höhenbestimmung eines Punktes in einem Messvorgang und um der im Gegensatz zum *Polygonzug* direkten Orientierung einer Zugseite Rechnung zu tragen, soll im Folgenden für das hier angewendete Messverfahren der Begriff *3D-Polarzug* [BRANDSTÄTTER 1983] verwendet werden.

Die Abbildung 6-17 verdeutlicht das Messprinzip eines beidseitig angeschlossenen 3D-Polarzuges in der Ebene, das auch als eine „fortgesetzte terrestrische Einzelpunktbestimmung“ bezeichnet werden kann. Ausgehend von einem bekannten Festpunkt werden nacheinander die Zugpunkte P_N und die davon optional angemessenen Objektpunkte OP_N mittels den polaren Messelementen $t_{N-1, N}$ und $s_{N-1, N}$ sowie dem Zenitwinkel $z_{N-1, N}$, der Instrumentenhöhe i_{N-1} und der Zielpunkthöhe p_N in der Lage und Höhe *vorläufig* verortet. Die dreidimensionalen Koordinaten des Abschlusspunktes P_N ergeben sich dann unter Berücksichtigung der Gl. 6-13 bis 6-15 und der fundamentalen Beziehung $t_{i,i+1} = \mu_{i,i+1} + N = \mu_{i,i+1} + |\delta| \pm |c|$ zu:

$$x_{N_{ist}} = x_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cos t_{i,i+1}) \quad (Gl.6-19)$$

$$y_{N_{ist}} = x_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \sin t_{i,i+1}) \quad (Gl.6-20)$$

$$z_{N_{ist}} = z_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cot z_{i,i+1} + i_i - p_{i+1}) \quad (Gl. 6-21)$$

Erst nach der Berechnung eines eventuell vorhandenen Widerspruchs zwischen der Soll- und Ist-Position des Abschlusspunktes mit

$$f_x = x_{N_{Soll}} - x_{N_{Ist}} = x_{N_{Soll}} - x_1 - \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cos t_{i,i+1}) \quad (\text{Gl. 6-22})$$

$$f_y = y_{N_{Soll}} - y_{N_{Ist}} = y_{N_{Soll}} - y_1 - \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \sin t_{i,i+1}) \quad (\text{Gl. 6-23})$$

$$f_z = z_{N_{Soll}} - z_{N_{Ist}} = z_{N_{Soll}} - z_1 - \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cot z_{i,i+1} + i_i - p_{i+1}) \quad (\text{Gl. 6-24})$$

und der anschliessenden, von [JORDAN et al. 1956] empfohlenen, streckenproportionalen Verteilung der Koordinaten- und Höhendifferenzen ergeben sich die endgültigen Koordinaten für einen Zugpunkt zu

$$\hat{x}_N = x_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cos t_{i,i+1} + \frac{s_{i,i+1}}{\sum s} \cdot f_x) = x_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta x_{i,i+1} + v_{\Delta x_{i,i+1}}) \quad (\text{Gl. 6-25})$$

$$\hat{y}_N = y_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \sin t_{i,i+1} + \frac{s_{i,i+1}}{\sum s} \cdot f_y) = y_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta y_{i,i+1} + v_{\Delta y_{i,i+1}}) \quad (\text{Gl. 6-26})$$

$$\hat{z}_{N_{Ist}} = z_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (s_{i,i+1} \cdot \cot z_{i,i+1} + i_i - p_{i+1}) + \frac{s_{i,i+1}}{\sum s} \cdot f_z = z_1 + \sum_{i=1}^{N-1} (\Delta z_{i,i+1} + v_{\Delta z_{i,i+1}}). \quad (\text{Gl. 6-27})$$

In einem letzten Schritt sind die von einem Zugpunkt aus bestimmten Objektpunkte, um die für diesen Zugpunkt gültigen Beträge zu verbessern (s. Gl. 6-28 bis 6.30). Grundsätzlich kann der 3D-Polarzug auch nur einseitig an einem bekannten Anfangspunkt angeschlossen werden, wodurch der Zugabgleich sowie die damit verbundene Kontrolle und höhere Zuverlässigkeit der Ergebnisse wegfallen.

$$x_{OP_N} = \hat{x}_N + s_{N,OP_N} \cdot \cos t_{N,OP_N} \quad (\text{Gl. 6-28})$$

$$y_{OP_N} = \hat{y}_N + s_{N,OP_N} \cdot \sin t_{N,OP_N} \quad (\text{Gl. 6-29})$$

$$z_{OP_N} = \hat{z}_N + (s_{N,OP_N} \cdot \cot z_{N,OP_N} + i_N - p_{OP_N}) \quad (\text{Gl. 6-30})$$

6.3.2.1. Fehlerabschätzung 3D-Polarzug

Neben den Abschlussdifferenzen f_x und f_y der Koordinaten sind für die Beurteilung der erzielten Lagegenauigkeit häufig die Fehler in Zugrichtung f_L (Längsfehler) und senkrecht dazu f_Q (Querfehler) von Interesse, da diese direkt an Lage und Aussehen des Zuges gekoppelt sind und nicht an die Ausrichtung des Koordinatensystems. Sowohl f_Q als auch f_L kann über einfache Winkelfunktionen aus den Koordinatendifferenzen abgeleitet werden (s. Abb. 6-18):

$$f_L = f_x \cdot \cos t + f_y \cdot \sin t \quad (\text{Gl. 6-31})$$

$$f_Q = f_y \cdot \cos t - f_x \cdot \sin t \quad (\text{Gl. 6-32})$$

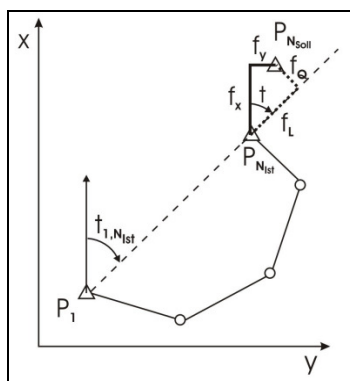


Abbildung 6-18: f_L, f_Q 3D-Polarzug

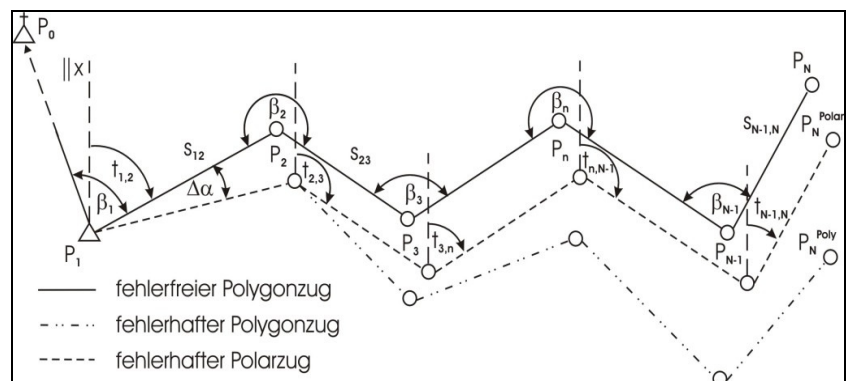


Abbildung 6-19: Fehlerfortpflanzung im Polygon- und Polarzug

Ebenso wie beim Bussolenzug, ergibt sich auch für den 3D-Polarzug eine günstigere Fehlerfortpflanzung als beim mit Brechungswinkeln gemessenen Polygonzug, da auf jedem Punkt die Richtungswinkel unabhängig voneinander bestimmt werden (s. Abb. 6-19). Ein Fehler im richtungsgebenden magnetischen Azimut beeinflusst somit nur die Lage der dazugehörigen Strecke und die daraus resultierende Querabweichung pflanzt sich nicht fort. Betrachtet man beispielsweise einen gestreckten Zug mit $(n-1)$ gleichlangen und gleichgenauen Seiten und Winkeln, dann kann nach [BAUMANN 1985] der Längs- und Querfehler eines mit Richtungs- oder Brechungswinkeln einseitig angeschlossenen Zuges über die Beziehung

Richtungswinkel: $\sigma_L = \sqrt{n-1} \cdot \sigma_s$ (Gl. 6-33) Brechungswinkel: $\sigma_L = \sqrt{n-1} \cdot \sigma_s$ (Gl. 6-35)

$$\sigma_Q = \frac{S_{ges}}{\sqrt{n-1}} \cdot \frac{\sigma_t}{\rho} \quad (Gl. 6-34) \quad \sigma_Q = S_{ges} \cdot \frac{\sigma_t}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{n}{3}} \quad (Gl. 6-36)$$

abgeschätzt werden. Hinsichtlich der Fortpflanzung eines Seitenfehlers besteht demnach kein Unterschied zum Polygonzug während die Querabweichung beim Polarzug durch viele Zugpunkte geringer wird. D.h. der Zug mit Richtungsmessung verlangt möglichst viele kurze Seiten, was der eher geringen Richtungs-genauigkeit eines magnetischen Kompasses (starke Verschwenkung langer Strecken) und der Erschlies-sung schwer einsehbarer Geländes entgegenkommt. Die Genauigkeit der Höhe ergibt sich in diesem Fall nach Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$\sigma_H = \sqrt{n-1} \cdot \sigma_{\Delta h} \quad (Gl. 6-37)$$

In Tabelle 6-16 wurden für zwei (einseitige) Polarzüge mit jeweils unterschiedlicher Gesamt- und Seitenlänge die zu erwartenden Fehler abgeschätzt. Es zeigt sich, dass ohne Fehlerabgleich nicht mit einer Positionsge-nauigkeit von $< \pm 2$ m am Zugende zu rechnen ist.

Zugeigenschaften	σ_Q [m]	σ_L [m]	σ_H [m]
$S_{ges}=500$ m, $\sigma_s=0,1$ m $\sigma_t=0,1$ m, $\sigma_{\Delta h}=0,26$ m	s=25 m	2,00	0,43
	s=50 m	2,91	0,30
$S_{ges}=1000$ m, $\sigma_s=0,1$ m $\sigma_t=0,1$ m, $\sigma_{\Delta h}=0,26$ m	s=25 m	2,80	1,60
	s=50 m	4,00	0,43

Tabelle 6-15: Abschätzung f_L und f_Q 3D-Polarzug

6.3.2.2. Testmessungen 3D-Polarzug

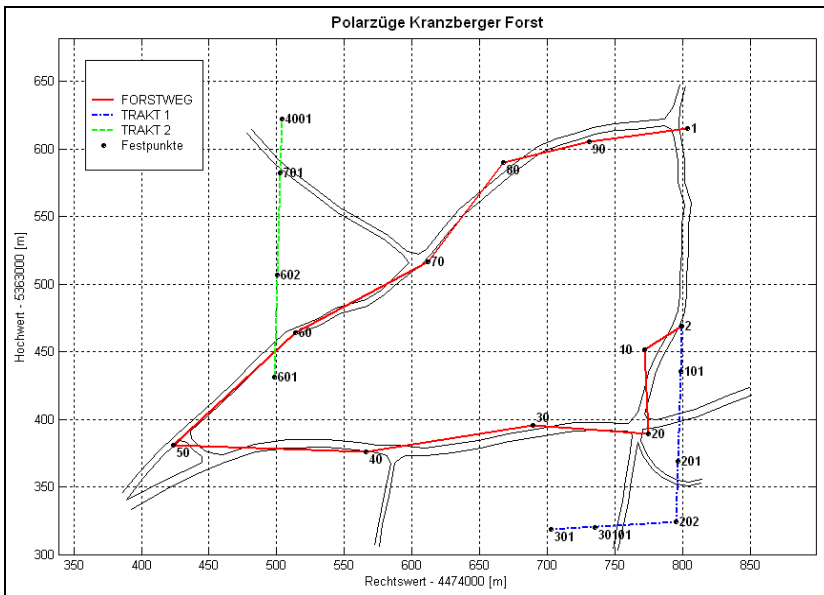


Abbildung 6-20: Übersicht Polarzüge Kranzberger Forst

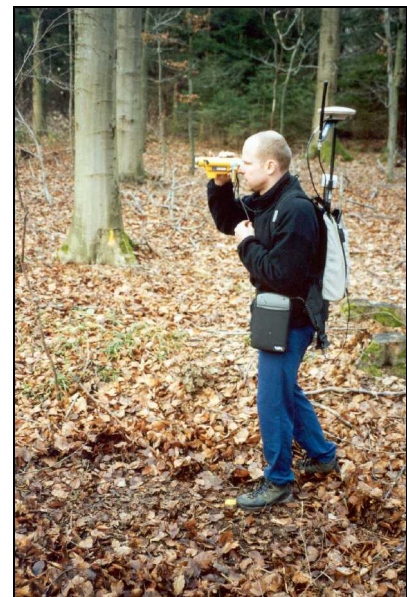


Abbildung 6-21: Polarzugmessung

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des 3D-Polarzug-Messverfahrens unter Verwendung des Laser-Ace 300 erfolgte anhand mehrerer Vergleichsmessungen im Kranzberger Forst und im Nationalpark Bayerischer Wald. Im Kranzberger Forst wurden hierfür drei verschiedene Züge über Sollpunkte in der Örtlichkeit vermarktet (s. Abb. 6-20) und auf Grund eventuell auftretender elektronischer Störfelder mit kompletter SmobGIS-Ausrüstung beobachtet (s. Abb. 6-21). Diese bestand aus einem DGPS-Rucksacksystem, Gürtel-PC, LA300 sowie einem Lotstab mit Leica Rundprisma inklusive Zieltafel, der von einer 2. Person auf die Zielpunkte aufzuhalten war. Die unterschiedlichen Eigenschaften der drei Polarzüge können der Tabelle 6-16 auf der nächsten Seite entnommen werden.

Zuglinie	Länge [m]	Fest- und Standpunkte	Mittlere Zielweite [m]	Gelände- und Bestandssituation
FORSTWEG	916,68	11 Festpunkte 28 Standpunkte	32,4	Breiter, gut befestigter Forstweg (Sand, Schotter); wechselnde Zugrichtung; Altbestand mit Laub- / Nadelwald, geringe Neigungswechsel
TRAKT 1	250,26	5 Festpunkte 15 Standpunkte	16,7	Wechselnder Geländeverlauf (Mulden, Hügel, Flachstück) und Bestandsaufbau (Altbestand, Jungwuchs mit Laub- und Nadelwald), 90°-Knick
TRAKT 2	229,41	4 Festpunkte 11 Standpunkte	20,9	Wechselnder Geländeverlauf (Abhang 602 -> 701) und Bestandsaufbau (Altbestand, Jungwuchs mit Laub- und Nadelwald)

Tabelle 6-16: Beschreibung Polarzüge Kranzberger Forst

Die Messungen beinhalten eine unterschiedliche Anzahl an durchgeführten Kompasskalibrierungen mit der internen Prüfroutine sowie keine Beobachtung von Referenzpunkten für die Bestimmung aktueller Korrekturwerte. Bei der Auswertung der 3D-Polarzüge wurden, wie bei der terrestrischen Einzelpunktbestimmung auch, lediglich die für den Messzeitpunkt und das Messgebiet gültigen Werte der Deklination und Meridiankonvergenz sowie die OptoLot-Konstante berücksichtigt. Damit ergeben sich die in den Tabellen 6-17 und 6-18 aufgeführten Ergebnisse, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

☞ Lagegenauigkeit:

Eine regelmäßige Durchführung der internen Kompasskalibrierung, die in diesem Fall alle 6-7 Standpunkte stattfand (~ 240 m), erhöht die Lagegenauigkeit im Abschlusspunkt um den Faktor 3. Bei den Polarzügen TRAKT 1 und TRAKT 2 wurde wegen der kurzen Zuglänge auf eine Zwischenkalibrierung verzichtet (Wirtschaftlichkeit). Nach dem Abgleich des jeweiligen Zuges liegen beim FORSTWEG mit einer Zuglänge von fast einem Kilometer die Zugpunkte mit einer max. Lageabweichung von 1,6 m und bei den kurzen Zügen im Gelände von < 1,1 m bzw. 0,48 m vor. Hierbei ist allerdings die Abweichung bei TRAKT 1 als zu hoch zu bewerten. Eine Analyse der Messergebnisse zeigt, dass bereits nach 110 m im Punkt 201 eine hohe Lagedifferenz vorliegt, die auf einen Fehler in der Richtung zurückzuführen ist ($f_Q = 2,0 \text{ m} / f_L = 0,7 \text{ m}$). Als Ursache kommen nur eine kurzzeitige Veränderung der lokalen Störfelder oder eine nicht erkannte fehlerhafte Anzielung bzw. Stanpunkt- und Zielpunktexzentrizitäten in Frage, da in allen anderen Abschnitten die Abweichungen in normaler Größenordnung vorliegen.

☞ Höhengenaugigkeit:

Bei allen drei Zügen ergibt sich nach dem Abgleich mit einer Abweichung von < 0,18 m eine für forstliche Applikationen sehr hohe Höhengenaugigkeit, wobei die regelmäßige Durchführung der Kompasskalibrierung erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Resultate hat. Auffallend sind die bei zwei Zügen vorherrschenden negativen Höhendifferenzen. Der vorliegende systematische Fehler könnte in der Praxis nur durch eine aus Referenzmessungen abgeleitete Neigungskorrektur (hier $\leq 0,1^\circ$) ausgeglichen werden.

Zuglinie	Länge [m]	KompassKal	Abweichung Zugmitte		Abweichung Zugende	
			Lage [m]	Höhe [m]	Lage [m]	Höhe [m]
FORSTWEG	917	nur zu Messbeginn	3,41	-0,72	10,32	-1,55
	917	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	1,42	-0,86	3,73	-1,56
TRAKT 1	250	nur zu Messbeginn	2,11	-0,40	3,57	-0,99
TRAKT 2	229	nur zu Messbeginn	0,95	0,23	1,42	0,26

Tabelle 6-17: 3D-Polarzüge Kranzberger Forst mit / ohne Zwischenkalibrierung und ohne Zugabgleich

Zuglinie	KompassKal	f_x [m]	f_y [m]	f_h [m]	max. Abweichung		Standardabweichung	
					Lage [m]	Höhe [m]	σ_{Lage} [m]	$\sigma_{Höhe}$ [m]
FORSTWEG	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	-3,69	0,49	-1,56	1,55	-0,18	0,51	0,06
TRAKT 1	nur zu Messbeginn	-1,74	3,12	-0,99	1,10	0,13	0,50	0,06
TRAKT 2	nur zu Messbeginn	-0,67	1,24	0,26	0,48	0,12	0,24	0,06

Tabelle 6-18: Ergebnisse 3D-Polarzüge Kranzberger Forst mit Zugabgleich

Zuglinie	Länge [m]	KompassKal	Abweichung Zugmitte		Abweichung Zugende	
			Lage [m]	Höhe [m]	Lage [m]	Höhe [m]
FORSTWEG Teil 1	466,13	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	0,57	-0,57	1,42	-0,86
FORSTWEG Teil2	450,71	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	3,04	-0,50	3,10	-0,71

Tabelle 6-19: Teilabschnitte Polarzug FORSTWEG ohne Zugabgleich

Zuglinie	KompassKal	fx [m]	fy [m]	fh [m]	max. Abweichung		Standardabweichung	
					Lage [m]	Höhe [m]	σ_{Lage} [m]	$\sigma_{Höhe}$ [m]
FORSTWEG Teil 1	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	-0,69	1,25	-0,86	0,65	-0,14	0,25	0,06
FORSTWEG Teil 2	Messbeginn +Zwischenkalibrierung	-3,01	-0,75	-0,71	0,83	-0,10	0,34	0,04

Tabelle 6-20: Teilabschnitte Polarzug FORSTWEG mit Zugabgleich

Vergleicht man die Ergebnisse der gemessenen 3D-Polarzüge ohne Zugabgleich mit den Werten der Abschätzung, dann entsprechen die Abweichungen trotz einiger Schwankungen in der Lage den Erwartungen. Nach der Durchführung eines Zugabgleiches sind die Messergebnisse sogar durchweg besser als die abgeschätzten Differenzen. Allerdings ist die Zuverlässigkeit nicht sehr hoch, wie ein weiteres Beispiel anhand der Tabellen 6-19 und 6-20 verdeutlicht. Diese zeigen die Ergebnisse des Polarzuges FORSTWEG, der in zwei getrennten Abschnitten von etwa gleicher Länge mit regelmäßiger Kompasskalibrierung beobachtet wurde. Während Teil 1 (von Punkt2 -> Punkt 50) bereits ohne Abgleich der Abschlussfehler gute Ergebnisse liefert, treten bei Teil 2 (von Punkt 50 -> Punkt 1) schon in der Zugmitte unerwartet hohe Lagedifferenzen auf. Die Analyse der Beobachtungswerte ergibt auch hier, dass auf einem der Zwischenpunkte ein überdurchschnittlich hoher Richtungsfehler vorliegen muss. Auch die vergleichende Betrachtung aller Beobachtungen sowie den daraus resultierenden Ergebnissen ergab keine konkreten Hinweise auf weitere genauigkeitsbeeinflussende Faktoren, wie beispielsweise steile Visuren oder der Verlauf eines Zuges (z. B. längs oder quer zum Erdmagnetfeld).

Hinsichtlich der praktischen Handhabung des LA300 haben sich keine Probleme ergeben. Das Gerät ist handlich, einfach zu bedienen, die Energieversorgung war mit 1-2 Batteriewechseln pro Messtag leicht zu gewährleisten und auch der Umgang mit dem OptoLot verlief nach kurzer Übung problemlos. Des Weiteren haben sich die Abschätzungen für die innere Genauigkeit der Streckenmessung und der Zielpunktanziehung durch eine Analyse der mehrfachen, unabhängigen Anzielung eines Prismas im praktischen Einsatz bestätigt (s. Tabelle 6-21). Dabei muss auch die unmittelbare und übersichtliche Visualisierung der Messwerte in dem für ArcPad entwickelten *LRF-Messeditor* positiv erwähnt werden., Hierdurch konnten mehrfach Ausreisser bzw. Fehlmessungen direkt im Feld erkannt, eliminiert und die Messung wiederholt werden (s. Abb. 6-22).

Genauigkeit Untergrund	σ Strecke [m]	σ Azimut [m]
Gelände	0,05	0,4
Forstweg	0,04	0,3

Tabelle 6-21: Innere Genauigkeit S und μ

Bleibt als abschliessendes Fazit festzuhalten, dass eine zuverlässige Positionsbestimmung < 1 m für Polarzüge mit einer Länge > 500 m ohne regelmäßige Kontrolle durch ausreichend genaue Referenzpunkte nicht möglich ist. Diese Ergebnisse haben sich auch durch die Testmessungen im Nationalpark Bayerischer Wald bestätigt. Hierbei sei nochmal explizit auf die Positionsqualität der verwendeten Festpunkte hingewiesen. Diese beeinflussen nicht nur mögliche Azimutkontrollen, sondern auch die absolute Lage- und Höhengenaugigkeit eines 3D-Polarzuges. Kommen auf Grund der geringen Punktdichte in Forstgebieten Echtzeit-Positionierungsverfahren wie z. B. DGPS zum Einsatz, die im Wald i. d. R. Genauigkeiten von > 1 m liefern (s. Kap. 5.2), dann entspricht diese dem Genauigkeitspotential eines Polarzuges mit dem LA300. Einfacher und wirtschaftlicher wäre es natürlich, ein Positionierungsverfahren anzuwenden, das gänzlich ohne Sollpunkte auskommt.

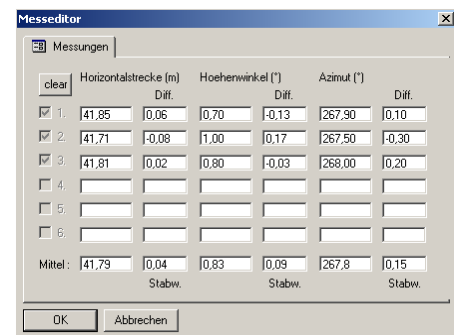


Abbildung 6-22: LRF-Messeditor ArcPad

6.4. DGM gestützte 3D-Positionierung (DGMMatch)

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Beispiele haben gezeigt, dass in Gebieten mit keinen bzw. wenigen koordinativ bekannten Referenzpunkten eine zuverlässige und ausreichend genaue 3D-Positionierung mit Hilfe von konventionellen Messverfahren nur schwer erreichbar ist. Da die Verwendung von weiter entfernten Fixpunkten (z. B. Kirchtürme oder Gipfelkreuze) auf Grund des nicht fokussierbaren Fernrohres des LaserAce 300 ausfällt, und auch die interne Kalibrierung zu unsicher bzw. die zuverlässige Eliminierung der zeit- und ortsvariablen Störeinflüsse durch eine permanent Durchführung der internen Kalibrierungsroutine nicht wirtschaftlich ist, wird in diesem Kapitel ein neuer 3D-Positionierungsansatz vorgestellt. Folgende Überlegungen bilden hierfür den Ausgangspunkt:

1. Die von einem Standpunkt aus mit einem handgetragenem 3D-Polarsensor polar aufgemessenen Punkte weisen in der Regel eine wesentlich höher Genauigkeit des Höhenunterschiedes ($\leq 0,2$ m) als die der Lage auf (≤ 1 m).
2. Seit 2003 steht für Teilbereiche des Nationalparks Bayerischer Wald ein hochgenaues und hochauflösendes digitales Geländemodell (DGM) aus Laserscannerbefliegungen zur Verfügung.

In Anlehnung an das für bebauten Gebiete vorgeschlagenen Messverfahren von [RESNIK 2001], bei dem bekannte Geoobjekte eines vorhandenen Geodatenbestandes als Zusatzinformation für eine genauere und zuverlässige polare Punktbestimmung mit einem handgetragenem 3D-Polarsensor miteinfließen, nutzt der in den folgenden Kapiteln ausführlich beschriebene Ansatz das hochgenaue und hochauflösende DGM als Referenzdatenbestand. Allerdings nicht nur für die qualitative Verbesserung des gemessenen Azimutes, sondern in erster Linie für eine *3D-Positionierung des Standpunktes ohne die Verwendung von im Gelände vermarkten Festpunkten*. Damit soll ein Verfahren realisiert werden, das sich besonders für den Einsatz in forstlichen und alpinen Bereichen eignet, in denen auch die 3D-Positionierung mit GNSS-gestützten Verfahren ihre Grenzen hat (s. Kapitel 5).

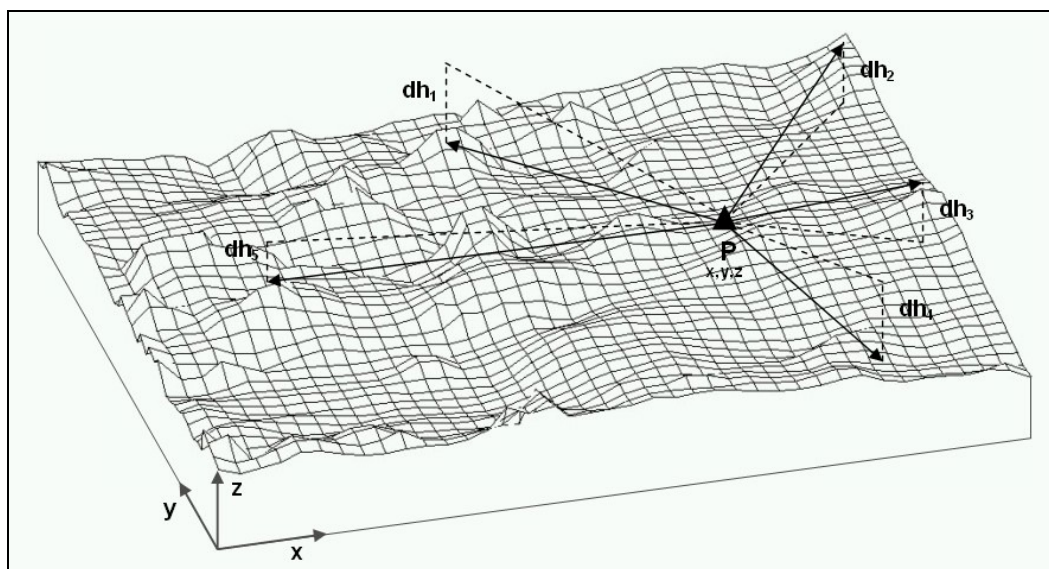


Abbildung 6-23: Einpassung Strahlenbündel in DGM

Als Referenzpunkte dienen hier vorhandene *markante Geländepunkte mit einem ausgeprägten Höhenunterschied zu ihrer Umgebung* (Mulden, Gräben, Böschungen etc.), die von einem koordinativ unbekanntem Standpunkt aus mit dem handgetragenem 3D-Polarsensor aufgenommen werden. Unter der Voraussetzung, dass das DGM diese Punkte in Bezug auf Lage und Höhe korrekt abbildet und die Zielpunkte durch den Sensor ausreichend genau erfasst werden, erfolgt anschliessend die Koordinierung des Standpunktes durch eine bestmögliche Einpassung des Strahlenbündels über die gemessenen Höhenunterschiede in das digitale Geländemodell (s. Abb. 6-23). Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte Verfahren der DGM gestützten 3D-Positionierung wird im Folgenden als *DGMMatch* bezeichnet und nutzt im Gegensatz zu den großflächigen Matching-Methoden von Punktwolken aus 3D-Laserscanning- oder photogrammetrischen Messverfahren (z. B. [GRUEN, AKCA 2005]) nur einige wenige 3D-Punkte zur Einpassung.

6.4.1. Digitales Geländemodell aus hochaufgelösten Laserscannerdaten

Als DGM wird die digitale Darstellung der Geländeoberfläche ohne Kunstbauten oder Vegetation durch räumliche Koordinatentripel einer Menge von Flächenpunkten (Stützpunkte) bezeichnet, die zu einer höhenmäßigen Beschreibung des Geländes dient [BILL, ZEHNER 2001]. Die Vegetations- und Bebauungsfläche beschreibt hingegen ein digitales Oberflächenmodell (DOM). Aus den gemessenen Tripeln, die meist unregelmäßig im Raum verteilt sind, erfolgt mit Hilfe geeigneter Interpolationsverfahren die Berechnung eines (orthogonalen) DGM-Rasters mit einer bestimmten räumlichen Auflösung (Rasterweite). Diese stellt ein Qualitätskriterium für DGM dar, da mit steigender Rasterweite der Grad der Generalisierung der realen Erdoberfläche als Modell zunimmt. Darüber hinaus haben auch die Herkunft der gemessenen Höhenwerte sowie die möglichst homogene Verteilung der Messpunkte einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des DGM. Für die Erfassung der Stützpunkte stehen je nach Zielapplikation verschiedene Methoden zur Verfügung. An dieser Stelle soll ausschliesslich das flugzeuggestützte Laserscanning näher betrachtet werden, das heute ein effizientes (Standard-)Werkzeug für die Generierung hochauflösender und genauer DGM darstellt (siehe u. a. [ATTWENGER, BRIESE 2003], [MAAS 2005]).

6.4.1.1. Flugzeuggestütztes Laserscanning

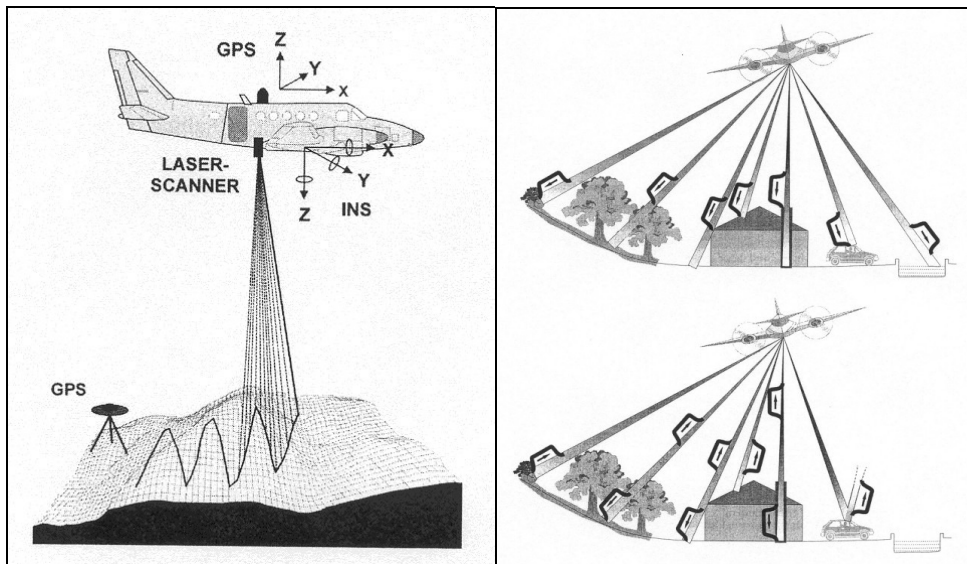


Abbildung 6-24: Komponenten und Messprinzip flugzeuggestütztes Laserscanning [KRAUS 2004]

Das Flugzeuglaserscanning (*Airborne LIDAR (Light Detection and Ranging)*) verwendet ein zeitsynchronisiertes Multisensorsystem mit den folgenden Hauptkomponenten (Abb. 6-24): *Laserdistanzmesser* mit Scanvorrichtung, *GPS-Empfänger* und *Inertiales Navigationssystem (INS)*. Das Aufnahmeprinzip basiert auf dem Impulsmessverfahren und verwendet einen stark gebündelten Laserstrahl, der durch einen Spiegel quer zur Flugrichtung abgelenkt und dessen Laufzeit zwischen ausgesendetem und von der Oberfläche reflektiertem Signal gemessen wird. Auf diese Weise erfolgt die Abtastung eines Geländestreifens entlang des Flugweges. Aus dem Abtastwinkel des Scanners und der Messfrequenz ergibt sich zusammen mit der Flughöhe über Grund, der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand der Fluglinien die Dichte und Verteilung der Messpunkte im Aufnahmegebiet. Der Raumbezug dieser 3D-Punktewolke wird über die Position und Lage der Sensoren im Raum definiert, die über differentiell korrigierte GPS-Beobachtungen und INS-Messungen abgeleitet werden. Primäres Resultat der Messung sind digitale Oberflächenmodelle mit einer Höhengenaugigkeit von 10-20 cm, wobei nach [FISCHER, KNÖRZER 2003] die Genauigkeit des Laserscanning in der Lage um den Faktor 2-6 schlechter als in der Höhe ist und im Wesentlichen von der Qualität der Entfernungsmessung und der GPS/INS-Positionierung, der Flughöhe sowie der Geländeneigung abhängt. Bei Datenraten bis zu 100.000 Punkten pro Sekunde liegt die räumliche Auflösung der erzeugten Oberflächenmodelle typischerweise bei einem Punkt pro Quadratmeter; für Sonderanwendungen sind auch Punktdichten von mehr als 10 Punkten pro Quadratmeter erreichbar [MAAS 2005]. Bei der Nachbearbeitung der Messdaten ist eine Filterung der Aufnahmepunkte möglich (Bodenpunkt, Objekt), da entlang eines Messstrahles Reflexionen an unterschiedlichen Stellen auftreten. Das Lasersystem zeichnet entweder den ersten (Abb. 6-24 rechts oben), den letzten oder aber beide (Abb. 6-24 rechts unten) von

den Objekten reflektierten Impulse auf, wobei manche Laserimpulse auf Grund von Spiegelungen oder Absorption (z.B. Autodach, Wasser) auch verloren gehen können. Neben der Ableitung von digitalen Geländemodellen wird das Verfahren daher heute auch für die Überwachung von Hochspannungleitungen, der Generierung von 3D-Stadtmodellen oder in der Forstwirtschaft für die Identifikation forstlicher Strukturen (z.B. Baumhöhen, Baumkronen) eingesetzt. Weitere Details zu den Mess- und Auswerteverfahren sowie den Einsatzmöglichkeiten finden sich u.a. in [ACKERMANN 1999], [KRAUS 2004], [PFEIFER 2003], [WAGNER et al. 2003].

6.4.1.2. DGM-Testgebiete Nationalpark Bayerischer Wald

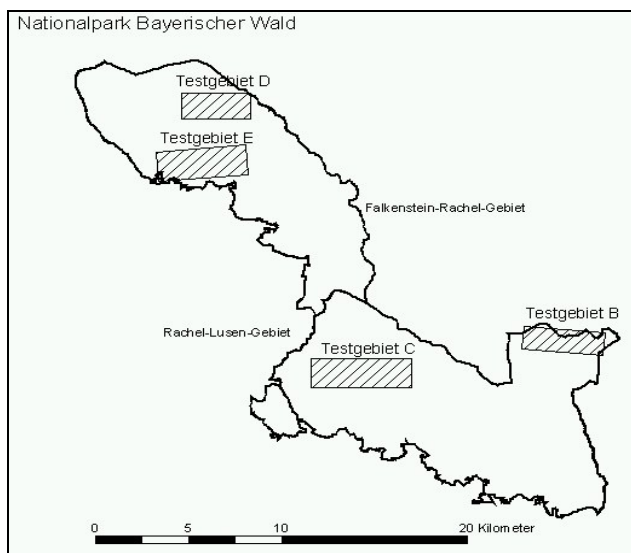


Abbildung 6-25: Testgebiete Laserscanningbefliegung

Im Rahmen des HTO-Teilprojektes 33-8 „Entwicklung innovativer Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen“ [HEURICH et al. 2003] wurden im Winter und Sommer 2002 von der Fa. TopoSys (Ravensburg) in vier über das Nationalparkgebiet verteilten Testgebieten Laserscanningbefliegungen durchgeführt und aus den Rohdaten sowohl ein digitales Geländemodell als auch ein digitales Oberflächenmodell berechnet. Die Befliegungen und die Untersuchungen zu den Fragestellungen, inwieweit sich die Waldstrukturen auf die Genauigkeit des DGMs, das mit dem TopoSys-Filter berechnet wurde, auswirken und wie diese durch Visualisierung der Laserrohdaten zu erkennen sind, wurden ausführlich in [FISCHER, KNÖRZER 2003] beschrieben. An dieser Stelle soll nur eine Zusammenfassung der für diese Arbeit relevanten Ergebnisse gegeben werden.

Die Winterbefliegung diente zur Erzeugung eines hochgenauen Geländemodells der Testgebiete, während aus der Sommerbefliegung die Beschreibung der Oberfläche und der Bestandsstrukturen in Form eines DOM resultierte. Das hierfür eingesetzte TopoSys-Lasersystem II verwendete zur Generierung der Rohdaten einen Faserscanner zur Ablenkung der Lasersignale quer zur Flugrichtung. Im Gegensatz zum Schwenkspiegel und zum Palmerscanner, die entweder ein zickzackartiges oder ellipsoidisches Abtastmuster an der Erdoberfläche erzeugen, ermöglicht der Faserscanner ein kreisförmiges Scanmuster mit einer hohen Scanrate (Punktabstand in Flugrichtung von max. 15 cm, quer dazu von max. 1,8 m). Die anschließende Erstellung des Höhenmodells durch die Fa. TopoSys beinhaltet die Berechnung der Gauß-Krüger-Koordinate im 12°-Meridianstreifen bezogen auf das Bessel-Ellipsoid für jeden Lasermesspunkt, die Einsortierung der bisher dahin nur streifenweise vorliegenden Daten in ein regelmäßiges Gitter mit einer Maschenweite von 0,5 m und die Filterung dieser Daten unter Verwendung eines speziellen Algorithmus, der neben der nächsten Nachbarschaft auch die Reflexionsreihenfolge berücksichtigt. Nach der Filterung liegt ein DGM mit einer Rasterweite von 1 m vor, das noch die beispielsweise durch Schatteneffekte hervorgerufenen Lücken enthält (sog. Lücken-DGM). Diese Lücken wurden durch eine nachbarschaftstreue Interpolation geschlossen und das finale DGM visuell sowie durch einen Vergleich mit Referenzdaten (z. B. Umringpolygone von Gebäuden) und 5-6 Höhenpasspunkten pro Testgebiet kontrolliert. Laut TopoSys konnte mit dieser Methode in allen Testgebieten eine absolute Genauigkeit von unter $\pm 0,5$ m in der Lage sowie unter $\pm 0,15$ m in der Höhe erreicht werden. Diese Aussagen und weitere Fragestellungen wurden anschliessend im Rahmen der o. g. Diplomarbeit anhand von terrestrisch detailliert erfassten Referenzflächen in den Testgebieten genauer untersucht. Diese Untersuchungen umfassten u. a.

- die Überprüfung der Genauigkeit des finalen (geschlossenen) DGMs,
- die Untersuchung der Auswirkungen der Korrektur der DGM-Lücken auf die Genauigkeit,
- die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Filters (Trennung Bodenpunkt – Objektpunkt) sowie
- die Untersuchung der DGM-Genauigkeit in Abhängigkeit vom Bewuchs (Bestandstyp).

Eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Daten der Winterbefliegung wird in Tabelle 6-22 gegeben. Die Untersuchungen ergaben, dass die Genauigkeit des Bodenmodells von vie-

len verschiedenen Faktoren abhängt. Neben der Punktdichte, der Rasterweite, der Lage- und Höheneinpassung sowie den Filteralgorithmen spielen vor allem der Bestand und Bewuchs eine Rolle. Das DGM für eine Fläche mit ausgeprägtem Totholzbestand verläuft im Schnitt über der Geländeoberfläche. Dabei wird der Abstand im Wesentlichen von der Höhe des liegenden Totholzes beeinflusst. Im Winter verhindert eine dichte Nadelholzverjüngung auf reinen Fichten- und Buchenbeständen eine hohe Durchdringungsrate und hebt auch hier das Bodenmodell teilweise an. Dafür verhindert im Sommer (erwartungsgemäß) ein dichter Buchenoberstand eine gute Abdeckung des Bodens mit Lasermessungen, was vor allem bei einem bewegten Geländerverlauf häufig zu Unterschlagung von Geländeübergängen führt. Es müssen hierbei sehr viele Lücken im DGM durch Interpolation geschlossen werden, wodurch sich meist ein sehr homogener (aber falscher) Verlauf ergibt. Im Gegensatz dazu, konnte beim DGM der Winterbefliegung kein nennenswerter Einfluss der Lücken auf die Genauigkeit des Bodenmodells festgestellt werden. Grund hierfür ist der in vielen Bereichen des Nationalparks gleichmäßige Verlauf des Geländes. In einer Alpen- oder Karstlandschaft muss hingegen mit größeren Abweichungen gerechnet werden.

Testgebiet	Höhengenauigkeit [m]		Abdeckung Lücken-DGM	Punktdichte [Punkte/m ²]	Bemerkungen
	absolut	relativ			
B	0,2 – 0,3 (oberhalb)	± 0,20	70% – 77%	4-5	- viel Totholz und Nadelholzverjüngung - keine Verbesserung durch höhere Punktdichte
C	0,1 – 0,3 (unterhalb)	± 0,25	60% – 98%	5-13 (Mittel = 10)	- Fichten und Buchen Altbestand mit Fichten- u. Buchenverjüngung - Totholz/Windwurf in Tief lagen
D	0,1 – 0,3 (ober- u. unterh.)	± 0,20	50% - 60%	4-5	- überwiegend Fichten und Tannen im Altbestand und Verjüngung - teils offen/räumig, teils geschlossen
E	0,1 – 0,3 (oberhalb)	± 0,30	34% - 70%	4-6	- überwiegend Fichten und Tannen im Altbestand und Verjüngung - teils offen/räumig, teils geschlossen

Tabelle 6-22: Ergebnisse DGM-Genauigkeitsuntersuchungen Winterbefliegung

Die kleinräumige Betrachtung des hochaufgelösten DGMs zeigt auch, dass die relative Höhengenaugkeit des Bodenmodells innerhalb von forstlichen Flächen etwas schlechter ist als von TopoSys angegeben und es punktuell zu Ausreissern im Bereich von – 1,6 m bis + 1,2 m kommen kann. Daher wird im Kapitel 6.4.4 noch mal auf die DGM-Qualität eingegangen und anhand von Praxisbeispielen überprüft, inwieweit das DGM den tatsächlichen Geländeverlauf repräsentiert und der Messpunkt des 3D-Polarsensors mit dem Modellpunkt zusammenfällt. Darüber hinaus ist aber festzuhalten, dass durch die Laserscannerbefliegung erstmalig für Teilbereiche des Nationalparks Bayersicher Wald ein DGM mit einer Rasterweite von 1 m und einer relativen Höhengenaugkeit zur Verfügung steht, die der eines handgetragenen 3D-Polarsensors entspricht. In Verbindung mit einer absoluten Genauigkeit von besser ± 0,5 m scheint somit eine ausreichend genauer Referenzdatenbestand für ein innovatives Positionierungsverfahren mit einer Zielgenauigkeit von 1-2 m zur Verfügung zu stehen, das in den folgenden Kapiteln beschrieben wird. Die für diese Entwicklung notwendige Datenbasis stellen drei Ausschnitte dar, die aus den finalen DGMs der Testgebiete C und E ausgeschnitten wurden. Die gewählten Bereiche zeichnen sich zum einen durch unterschiedliche Geländestrukturen und zum anderen durch eine ausreichende Anzahl an koordinativ bekannten Testpunkten aus. Weitere Merkmale können der Tabelle 6-23 entnommen werden. Einen visuellen Eindruck geben die Abbildungen 6-26 bis 6-28 auf Seite 125, die jeweils einen 60 bzw. 80 m breiten Ausschnitt dieser Bereiche zeigen und die Fotos der Umgebung der Testpunkte im Anhang C.

Testgebiet	Größe DGM Ausschnitt	Filegröße	Charakteristik
Schachtenau	271 m x 251 m	2,6 MB	stark strukturiertes Gelände (Strasse, Bachböschung, Brücke, Wiese, Totholz, Jungwald)
Scheuereck	751 m x 511 m	14,8 MB	sehr homogener Geländeverlauf (gleichmäßig abfallender Hang, Strasse, alter Baumbestand)
Rehruck	470 m x 391 m	7 MB	leicht strukturiertes Gelände (unterschiedlich abfallender Hang, Senke, alter Baumbestand)

Tabelle 6-23: Merkmale der Testgebiete für die DGM gestützte 3D-Positionierung

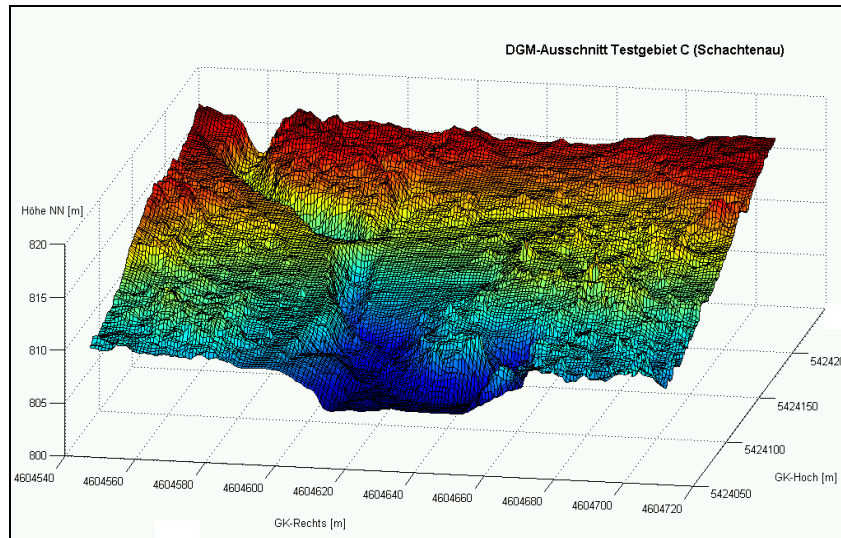


Abbildung 6-26: DGM-Ausschnitt Testgebiet C (Schachtenau)

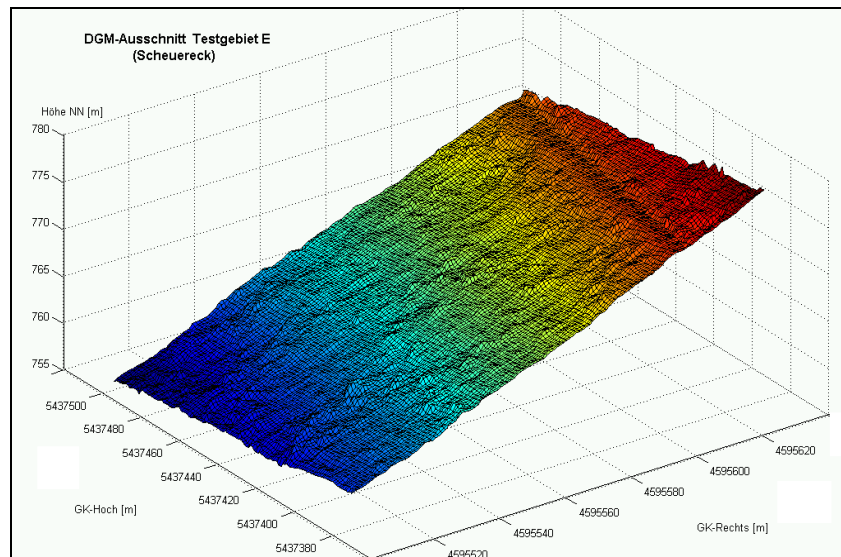


Abbildung 6-27: DGM-Ausschnitt Testgebiet E (Scheuereck)

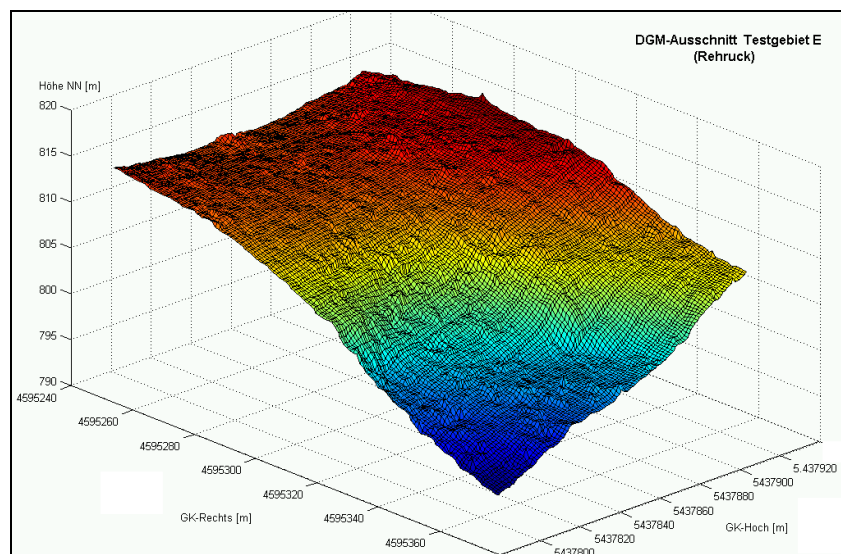


Abbildung 6-28: DGM-Ausschnitt Testgebiet E (Rehruck)

6.4.2. Basisberechnung und softwaretechnische Umsetzung DGMMatch

Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte Verfahren *DGMMatch* soll zum besseren Verständnis in drei getrennten Abschnitten erläutert werden. Zunächst werden die Berechnungsschritte der *DGMMatch-Basisversion* und die damit erzielbaren Ergebnisse beschrieben. Danach folgen eine auf den Resultaten dieser Basisberechnung aufbauende Diskussion verschiedener Einflussgrößen und Auswertestrategien sowie die Präsentation der *integrierten DGMMatch-Berechnung* und den daraus resultierenden Ergebnissen. Alle für das Verfahren notwendigen und in den nächsten Kapiteln ausführlich beschriebenen Funktionen wurden mit Hilfe der Programmumgebung MATLAB 6.5 softwaretechnisch umgesetzt und stehen als m-Files zur Verfügung. MATLAB ist eine hochentwickelte Sprache für technische Berechnungen und eine interaktive Umgebung für die Algorithmenentwicklung, die Visualisierung und Analyse von Daten sowie für numerische Berechnungen der Firma Mathworks [MATHWORKS 2005].

6.4.2.1. Eingabe- und Protokolldateien

Die Positionsberechnung mittels des DGMMatch-Algorithmus erfolgt in einem Batch-Betrieb und erfordert zu Beginn die Angabe der folgenden Dateien:

- **DGM-Datei:** Pro Zeile Zeilennummer, GK-Rechts- und Hochwert, Höhe im ASCII Format
- **LRF-Datei:** ASCII basierte Datei mit allen notwendigen standpunktbezogenen Informationen (Standpunktnummer, Sollkoordinaten, Näherungskoordinaten und Suchbereich) und den Beobachtungswerten (Azimut, Elevation, Schrägdistanz, Korrektur OptoLot, Azimut- und Neigungskonstante, Instrumenten- und Reflektorhöhe). Mit Hilfe des Prozentzeichens können Messdatensätze von der Berechnung ausgeschlossen werden. Ein Beispiel für eine LRF-Datei ist:

```

rastl                               %Standpunktnummer
4604584.50 5424161.23 809.18         %Sollkoordinaten
4604574.50 5424171.23 819.18         %Näherungskoordinaten
20.000                               %Suchbereich
1 359.33 3.57 25.890 0.219 0.7500 0.000 1.550 1.500 %Az, El, D, Optolot-Korr. AzKonst. NeigKonst. [°,m],LRF-
Instrumentenhöhe und Reflektorhöhe
%2 47.43 3.83 27.530 0.206 0.7500 0.000 1.550 2.150 %Az, El, D, Optolot-Korr. AzKonst. NeigKonst. [°,m],LRF-
Instrumentenhöhe und Reflektorhöhe
...

```

- **Log-Datei:** Textdatei, in die alle von DGMMatch im Matlab-Command-Window erzeugten textuellen Ergebnisse kopiert werden (Berechnungsprotokoll). Das folgende Beispiel zeigt die Ausgabe der im nächsten Kapitel beschriebenen Basisberechnung:

LRF-DGM-Matching Berechnung

Standpunkt: rastl

Tatsächliche Genauigkeit Näherung: dR=-10.00 dH=10.00 dZ=10.00

-----Interpolation: 1.00 [m] -----

Suchbereich: 20.00

Ausgabe der 5 besten Lösungen aus Matrix D (alle dH-Mittel im DGM-Suchbereich):

Rasterweite: 1.00 [m]

Koordinaten des 1-besten Punktes: R 4604584.000 H 5424161.000 Z 809.110

Mittlere Abweichung LRF-Punkte vom DGM: 0.217 [m] +/- 0.353 [m] basierend auf 6/ 6 LRF-Punkten

Absolute Ablage Sollpunkt - 1-besten gefundenen Punkt: dL = 0.550 dH = 0.070

Rasterweite: 1.00 [m]

Koordinaten des 2-besten Punktes: R 4604584.000 H 5424162.000 Z 809.210

Mittlere Abweichung LRF-Punkte vom DGM: 0.231 [m] +/- 0.339 [m] basierend auf 6/ 6 LRF-Punkten

Absolute Ablage Sollpunkt - 2-besten gefundenen Punkt: dL = 0.918 dH = 0.030

...

Hierbei ist zu beachten, dass im derzeitigen Entwicklungsstadium noch Angaben zum Sollpunkt sowohl in der LRF-Datei als auch bei den Ergebniswerten zur bessern Analyse des Verfahrens mitverarbeitet und angezeigt werden (z. B. Lagefehler beste Lösung zum Sollpunkt). Diese stünden bei einem zukünftigen, operationellen Einsatz selbstverständlich nicht zur Verfügung. Stattdessen könnte auf die Zusatzinformationen der integrierten DGMMatch-Berechnung zurückgegriffen werden (z. B. spezielle Plots).

6.4.2.2. Berechnungsschritte und Ergebnisse Basisberechnung

Die Basisberechnung bildet das zu Beginn des Kapitels beschriebene Grundprinzip des DGMMatch-Verfahrens ab und beinhaltet die folgenden Auswerteschritte:

1. Näherungskoordinaten:

Einlesen eines Näherungspunktes $P_{\text{Näherung}}$ für den gesuchten Standpunkt (z. B. aus GPS-Messung mit einfachem Handheld-GPS).

2. Startwert Berechnung

$P_{\text{Näherung}}$ auf nächstgelegenen Rasterpunkt setzen, der den Startwert für die Berechnung im DGM-Raster liefert. Diese rasterorientierte Auswertung bedingt bei einem 1 m Raster maximal ein Fehler von 0,70 m (Abstand Sollpunkt in Rasterzelle).

3. Suchbereich und DGM-Ausschnitt

Definition des Suchbereiches S um $P_{\text{Näherung}}$ und den Zielpunkten anhand der Angabe aus der LRF-Datei sowie Festlegung des für die Berechnung maßgeblichen DGM-Ausschnittes (Suchbereich + 3 m Sicherheitszuschlag), so dass die DGM-Datei nicht vollständig zu prozessieren ist. Der Suchbereich S ist größer zu wählen, als die geschätzte Positionsgenauigkeit von $P_{\text{Näherung}}$.

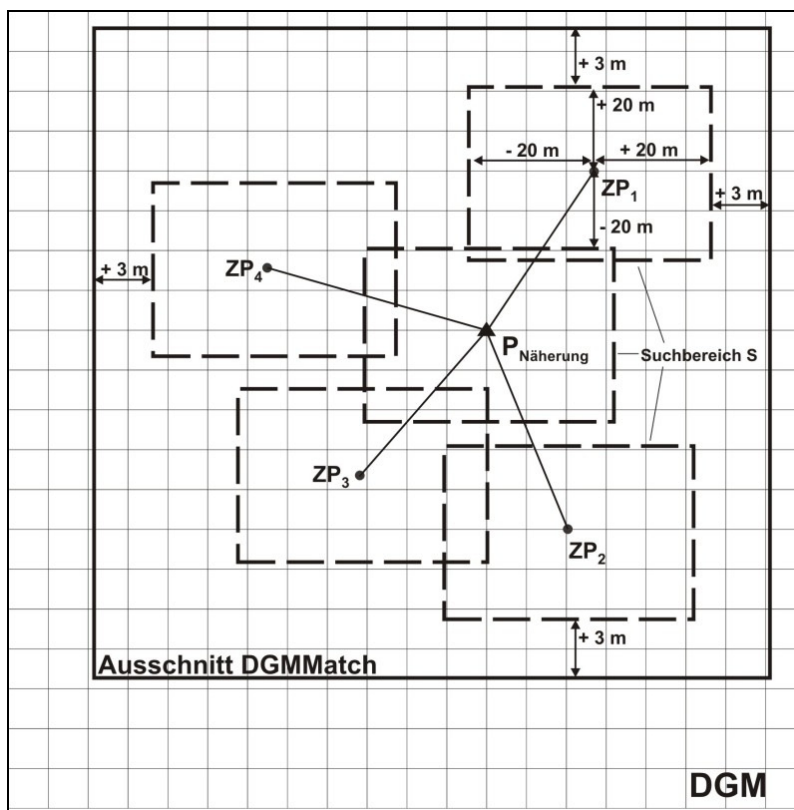


Abbildung 6-29: Definition DGM-Ausschnitt der DGMMatch-Auswertung

4. Mittel der Höhenunterschied-Differenzen

Beginnend mit dem ersten Rasterpunkt in der linken oberen Ecke von S wird für jeden Rasterpunkt innerhalb des Suchbereiches das Mittel dH_m bestimmt.

$$dH_m^j = \frac{\sum_1^n |dH_i|}{n} = \frac{\sum_1^n |(dhDGM_i - dhLRF_i)|}{n} \quad (\text{Gl. 6-38})$$

mit $dhDGM_i$ = Höhenunterschied Rasterpunkt – Zielpunkt aus dem DGM durch bikubische Interpolation
 $dhLRF_i$ = Höhenunterschied Rasterpunkt – Zielpunkt aus Messung 3D
 n = Anzahl der Zielpunkte

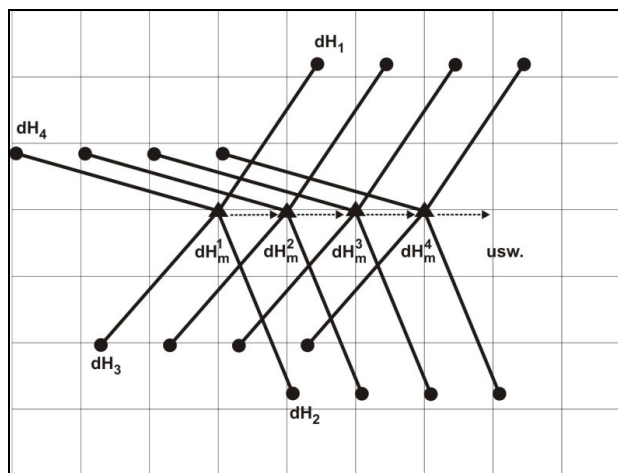


Abbildung 6-30: Berechnung dH_m pro Rasterpunkt

5. Ausgabe Berechnungsergebnis dH_m

Alphanumerische Ergebnisanzeige der fünf Rasterpunkte mit den niedrigsten dH_m aus dem gesamten Suchbereich am Bildschirm und Speicherung dieser Werte in der Log-Datei (Beispiel s. oben). Zusätzlich werden die Ergebnisse aller Rasterpunkte aus dem Suchbereich zusammen mit dem Näherungspunkt, der besten Lösung sowie dem Sollpunkt in einem farbigen Kontourplot dargestellt (s. Abb. 6-31 und 6-32).

6. Option: Berechnung 25 cm oder 10 cm - Raster

Optional kann die Berechnung mit einem 25 cm oder 10 cm -Raster DGM wiederholt werden, das durch eine bikubische Interpolation aus dem 1 m Raster abgeleitet wird. Ergebnisdarstellung wie bei Punkt 5.

7. Plots

Grafische Darstellung der räumlichen Ausdehnung des DGMs inklusive des für DGMMatch verwendeten Ausschnittes (Kontrolle Randlage), räumliche Verteilung (inkl. Höhenunterschied) der LRF-Zielpunkte sowie 3D-Visualisierung des DGM-Ausschnittes mit Hervorhebung des Suchbereiches um den Näherungspunkt und Darstellung von *Sollpunkt*, *Näherung* und *Beste Lösung* (s. Abb. 6-33 bis 6-35).

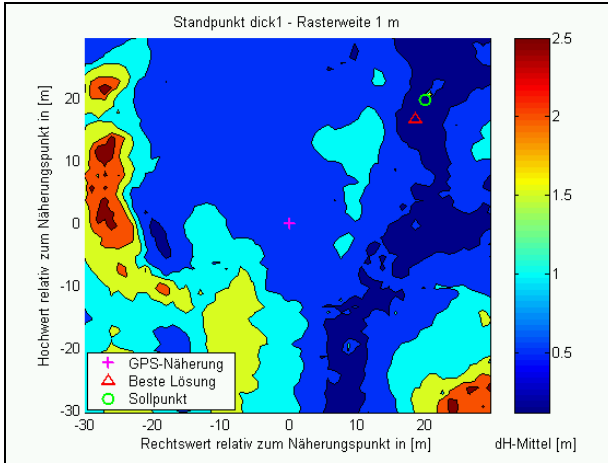


Abbildung 6-31: Konturplot dH_m Rasterweite 1 m

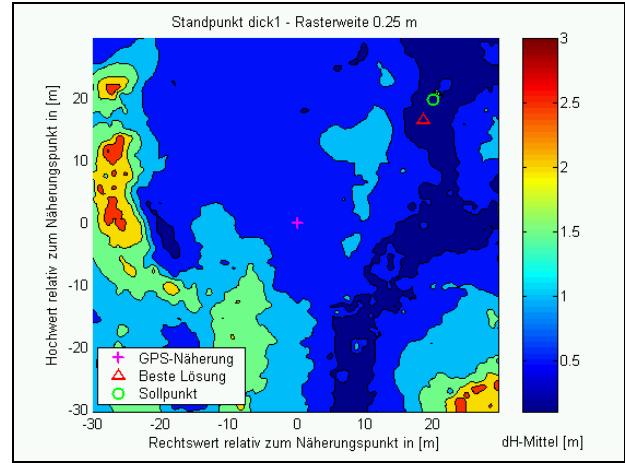


Abbildung 6-32: Konturplot dH_m Rasterweite 0.25 m

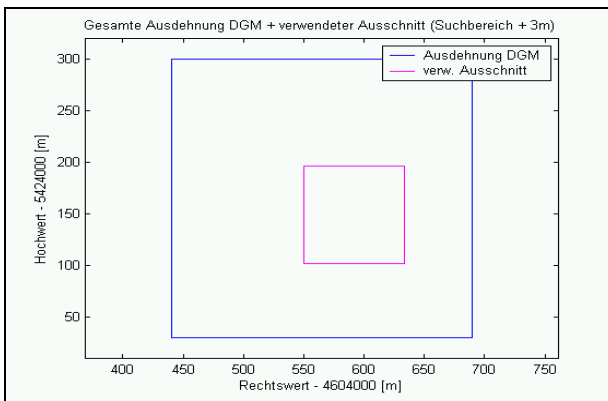


Abbildung 6-33: Plot DGM-Ausdehnung

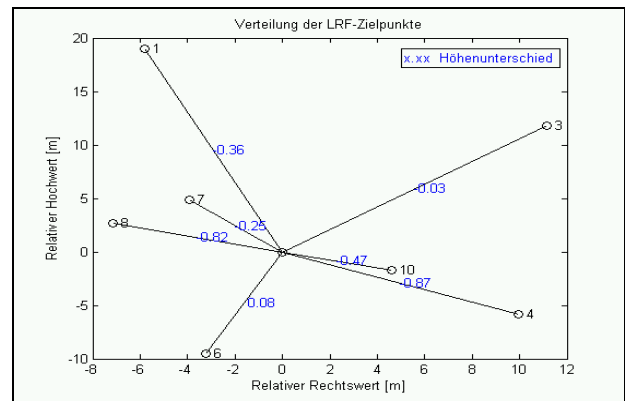


Abbildung 6-34: Plot LRF-Zielpunkte

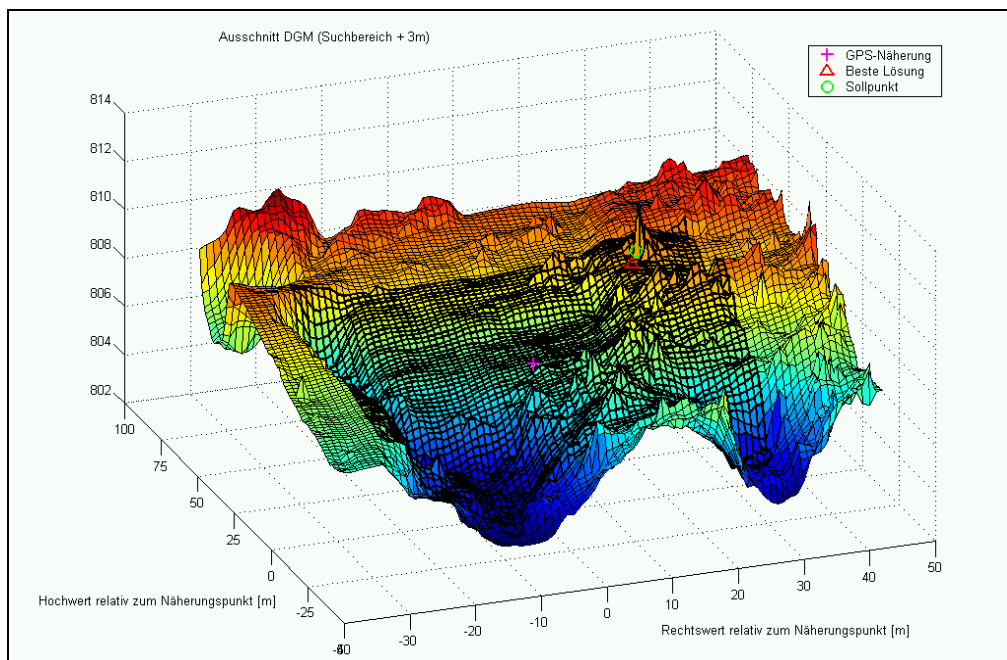


Abbildung 6-35: 3D-Visualisierung des verwendeten DGM-Bereiches

Mit Hilfe dieser DGMMatch-Version (Basisberechnung) wurde die Position von sechs koordinativ bekannten Punkten aus den drei Testgebieten berechnet, wobei folgende Parameter variiert wurden:

- ☞ Genauigkeit der Näherung (± 10 m)
- ☞ Größe Suchbereich (4 - 20 m)
- ☞ Anzahl der Zielpunkte pro Standpunkt (3-20), damit werden automatisch auch die Verteilung und der Typ der Zielpunkte (Ebene, Böschung, Kante etc.) sowie durch ihre Zielweite auch die Größe des verwendeten DGM-Ausschnittes beeinflusst.
- ☞ Rasterweite (1 m, 0.25 m, 0.1 m).

Punkt	DGM-Merkmale	Suchbereich [m]	Rasterweite [m]	Anzahl Zielpkt.	Genauigk. Näherung [m]	Anzahl Berechnungen	Beste Lösung der 5 kleinsten dH_m			Differenz der fünf besten dH_m [m]
							dLage [m]	dHöhe [m]	dH_m [m]	
RAST1	Freifläche, relativ eben mit markanten Geländeformen (Bachböschung, Strasse, kleine Geländekante). Zielweiten: 8 m - 49 m	10	1.00	4-17	± 5	9	0.55 - 1.48	0.03 - 0.07	0.04 - 0.24	0.014 - 0.081
		10	0.25	4-17	± 5	11	0.57 - 4.49	0.01 - 0.68	0.07 - 0.24	0.006 - 0.102
		10	0.10	8-17	± 5	3	0.66 - 1.28	0.02 - 0.04	0.07 - 0.15	0.002 - 0.149
DICK1	Rand Stangenholz / Jungwald, sehr schlechte Sichten, kaum markante DGM-Punkte (kleine Geländekante, Mulde). Zielweiten: 3 m - 33 m	10	1.00	3-10	± 5	6	0.33 - 7.28	0.03 - 0.22	0.03 - 0.12	0.029 - 0.044
		10	0.25	3-10	± 5	6	0.33 - 4.32	0.06 - 0.14	0.05 - 0.11	0.005 - 0.017
		10	0.10	10	+ 5	1	0.33	0.66	0.10	0.005
		7	1.00	4 - 8	+ 5	5	0.38 - 9.06	0.03 - 0.62	0.07 - 0.13	0.020 - 0.063
		7	0.25	4 - 8	+ 5	5	0.40 - 5.45	0.04 - 0.53	0.053 - 0.122	0.006 - 0.027
		7	0.10	4 - 8	+ 5	3	0.33 - 0.63	0.06 - 0.13	0.50 - 0.104	0.003 - 0.016
		5	1	6	+ 2	1	0.38	0.03	0.06	0.064
5	0.25	6	+ 2	1	0.40	0.04	0.06	0.010		
STANG1	Stangenwald, kurze Sichten, eben mit wenigen markanten Geländepunkten. Ostseite mit langgestreckten, in gleicher Richtung verlaufenden Geländeformen (Strasse, Bach). Zielweiten: 3 m - 27 m	10	1.00	16	± 5	4	5.29 - 8.13	0.34 - 0.56	0.20 - 0.22	0.018 - 0.021
		10	0.25	16	± 5	3	0.87 - 6.87	0.10 - 0.47	0.19 - 0.22	0.003 - 0.008
		10	0.10	16	± 5	2	4.38 - 6.62	0.18 - 0.43	0.19 - 0.21	0.003
SCHEU3	Altbestand, gleichmäßig geneigter Hang mit einigen, wenigen Unebenheiten sowie durchlaufender Strasse (mit kleiner Böschung). Zielweiten: 12 m - 68 m	10	1.00	5 + 20	± 5	3	1.41 - 15.01	0.10 - 1.72	0.14 - 0.15	0.014 - 0.023
		10	0.25	5 + 20	± 5	3	0.39 - 15.04	0.12 - 1.68	0.16 - 0.17	0.005 - 0.009
		10	0.10	5 + 20	± 5	2	0.34 - 15.04	0.13 - 1.67	0.12 - 0.13	0.001 - 0.004
SCHEU6	Windbruch ausgeräumt, gleichmäßig geneigter Hang mit einigen, wenigen Unebenheiten sowie durchlaufender Strasse (mit leichter Böschung). Zielweiten: 12 m - 68 m	10	1.00	3 + 17	± 5	4	3.49 - 5.14	0.10 - 0.52	0.03 - 0.11	0.103 - 0.113
		10	0.25	3 + 17	± 5	4	2.08 - 5.07	0.14 - 0.51	0.20 - 0.11	0.007 - 0.550
		10	0.10	17	± 5	1	2.08	0.14	0.09	0.005
		4	1.00	17	-2	1	3.90	0.37	0.10	0.035
		4	0.25	17	-2	1	2.08	0.14	0.10	0.034
		4	0.10	17	-2	1	2.08	0.14	0.10	0.034
MISCH2	Altbestand, lange Sichten, kleinräumig wenig markante Geländeformen großflächige Senke. Zielweiten: 9 m - 89 m	20	1.00	17	± 10	1	0.65	0.35	0.21	0.025
		20	0.25	17	± 10	1	0.40	0.30	0.16	0.019
		10	1.00	2-17	± 5	18	0.65 - 9.14	0.12 - 0.95	0.01 - 0.21	0.008 - 0.065
		10	0.25	2-17	± 5	15	0.40 - 9.40	0.06 - 0.31	0.02 - 0.16	0.004 - 0.033
		10	0.10	4-17	± 5	5	0.38 - 2.72	0.08 - 0.30	0.03 - 0.16	0.002 - 0.005

Tabelle 6-24: Ergebnisse DGMMatch Basisberechnung

Die Ergebnisse in der Tabelle 6-24 zeigen, dass das DGMMatch-Verfahren grundsätzlich das Potential für eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von < 1 m besitzt, da immer mindestens eine der Berechnungsvarianten auf einem der Testpunkte diese Genauigkeit aufweist. Allerdings lassen sich die für eine erfolgreiche Auswertung zu verwendenden Parameter nicht eindeutig definieren, weil diese auf Grund der zum Teil sehr unterschiedlichen DGM-Bedingungen zwischen den einzelnen Testpunkten stark variieren. Vor allem ist die Signifikanz des Hauptkriteriums „kleinstes dH_m“ sehr gering. In vielen Fällen liegen die dH_m der fünf besten Rasterpunkte nur wenige mm oder cm auseinander, obwohl diese Punkte räumlich mehrere Meter voneinander entfernt sind. Dies wird auch in den beiden Kontourplots der Abbildungen 6-31 und 6-32 deutlich, in denen die relativ große und gleichfarbige Fläche (dunkelblau) viele Rasterpunkte mit geringem dH_m darstellt. Auch die Veränderung der Rasterweite trägt hier nur bedingt zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Berechnungsergebnisses bei. So führt eine Rasterweite von 0.25 m in einigen wenigen Fällen zu einem verbesserten Ergebnis oder stärkt zumindest das Ergebnis aus der Berechnung mit einer Rasterweite von 1 m. Hingegen bringt die Reduktion der Rasterweite auf 0.1 m objektiv betrachtet keine Verbesserung in dem numerischen Berechnungsergebnis und dessen Zuverlässigkeit. Zumal die geringere Auflösung auch eine Verlängerung der Rechenzeit zur Folge hat, wie die Tabelle 6-25 zeigt. Hinsichtlich der zu verwendenden Anzahl von Zielpunkten sprechen die Erfahrungen aus dieser Auswertung dafür, grundsätzlich möglichst viele Zielpunkte (> 10) für ein zuverlässiges Ergebnis zu verwenden. Dies trifft vor allem bei wenig strukturierten Geländebereichen zu. Bei sehr markanten Geländeformen kann diese Anzahl verringert werden. Ist die Qualität des DGM schlecht, dann spielt die Anzahl der Zielpunkte keine Rolle (s. Beispiel STANG1).

Rasterweite [m]	Anzahl Zielpunkte	Größe Suchbereich [m]	Rechenzeit [Minuten] (AMD mobile Athlon 2000+, 512 MB RAM)
1	17	10	< 1
0.1	17	10	5-6
0.1	10	20	5

Tabelle 6-25: Rechenzeit Basisberechnung DGMMatch

Eine Zusammenfassung der Basisberechnungsergebnisse in der Tabelle 6-26 soll nochmal das Potential des Verfahrens verdeutlichen. Allerdings dürfen die Resultate lediglich als Tendenz gewertet werden, da die Auswertung der einzelnen Testpunkt nicht immer mit den gleichen Parametern und mit einer unterschiedlichen Anzahl an Berechnungen durchgeführt wurde.

Punkt	Lagegenauigkeit der Lösung	Anzahl Lösungen im Suchbereich			Anteil pro Punkt	Lagegenauigkeit über alle Punkte	Höhengenauigkeit über alle Punkte
		1 m	0.25 m	0.10 m			
	<1 m	8	7	2	74 %	< 1 m = 50 % 1 – 5 m = 35 % > 5 m = 15 %	< 0,5 m = 87 % 0,5 – 1 m = 12 % > 1 m = 1 %
RAST1	1-5 m	1	4	1	26 %		
	>5 m	0	0	0	0 %		
	<1 m	8	6	3	63 %		
DICK1	1-5 m	2	5	0	26 %		
	>5 m	2	1	0	11 %		
	<1 m	0	2	0	22 %		
STANG1	1-5 m	0	0	1	11 %		
	>5 m	4	1	1	67 %		
	<1 m	1	2	1	50 %		
SCHEU3	1-5 m	1	0	0	12 %		
	>5 m	1	1	1	38 %		
	<1 m	0	0	0	0 %		
SCHEU6	1-5 m	4	4	2	83 %		
	>5 m	1	1	0	17 %		
	<1 m	8	9	3	50 %		
MISCH2	1-5 m	9	6	2	42 %		
	>5 m	2	1	0	8 %		
		44%	42%	14%			

Tabelle 6-26: Analyse der Ergebnisse Basisberechnung

6.4.3. Einflussgrößen DGMMatch

Um das im vorherigen Kapitel aufgezeigte Potential des DGMMatch-Verfahrens für eine ausreichend genaue und zuverlässige 3D-Positionierung durch einen optimierten Algorithmus besser nutzen zu können, werden an dieser Stelle zunächst die wesentlichen Einflussgrößen näher betrachtet und diskutiert.

☞ Geländeform:

Das DGMMatch-Verfahren kann nur dann erfolgreich angewendet werden, wenn markante und gut im Raum verteilte Geländestellen in ausreichender Anzahl vorhanden sind. Im Hinblick auf eine möglichst hohe Signifikanz ist darauf zu achten, dass der Höhenunterschied dH zwischen benachbarten Rasterpunkten mindestens so groß ist wie die zu erwartende Höhengenaugigkeit des DGMs σ_{DGM} plus die erreichbare Messgenauigkeit des Sensors σ_{dH} für die beobachteten dH . Eine allgemeingültige Aussage zu der Mindestanzahl an Punkten und deren Höhenunterschiede kann an dieser Stelle allerdings nicht gegeben werden, wie die folgenden einfachen und schematischen Beispiele unterstreichen sollen:

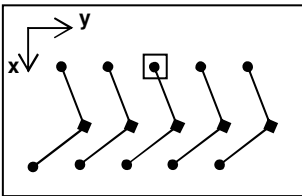
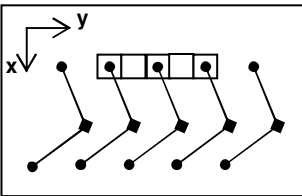

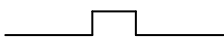
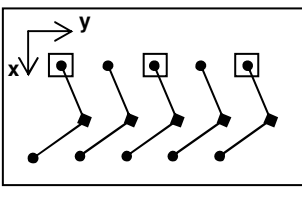
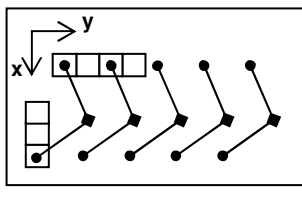
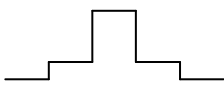
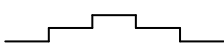
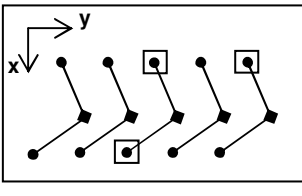
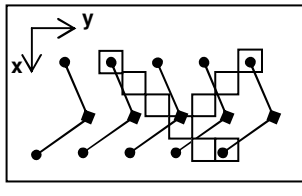
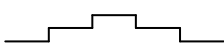
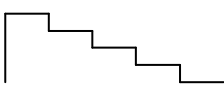
Anzahl Geländestellen DGM	Lage Geländeformen DGM	Geländeform Umgebung Zielpunkt
 <p>Eine Geländestelle gemessen → signifikant</p>	 <p>Eine Geländestelle gemessen → nicht signifikant</p>	 <p>signifikant</p>  <p>nicht signifikant</p>
 <p>Eine Geländestelle gemessen → nicht signifikant</p>	 <p>Zwei Geländestellen gemessen → signifikant</p>	 <p>signifikanter</p>  <p>nicht signifikant</p>
 <p>Zwei Geländestellen gemessen → signifikant</p>	 <p>Zwei Geländestellen gemessen → signifikant</p>	 <p>nicht signifikant</p>  <p>nicht signifikant</p>

Tabelle 6-27: Einfluss markanter Geländeformen auf die DGMMatch-Punktbestimmung

Hierbei markieren die Quadrate die DGM-Rasterzellen mit Geländestellen, die eine gleiche markante Höhe aufweisen, während die übrige (weisse) Fläche DGM-Zellen mit ohne Geländehöhe symbolisiert. Die Raute kennzeichnet den möglichen Standpunkt der Messung, die Kreise die mit dem 3D-Polarsensor angemessenen Zielpunkte. Aus den Grafiken ist leicht ersichtlich, dass eine eindeutige Positionsbestimmung von der Anzahl und der Genauigkeit der Zielpunkte, deren räumlichen Verteilung in Bezug auf die Achsen des Koordinatensystems sowie ihrem Höhenunterschied gegenüber den benachbarten Rasterpunkten abhängt. Da sich diese Parameter u. a. durch die im DGMMatch-Verfahren angewendete Mittelbildung zum Teil gegenseitig beeinflussen und die Geländeformen in der Natur auch noch erheblich fließender und komplexer in ihrer räumlichen Lage vorliegen, lässt sich hier keine allgemeingültige, formelbasierte Regel definieren. Stattdessen werden in den nächsten Kapiteln einige Empfehlungen gegeben, die sich aus den bisherigen Erfahrungen ableiten. So zeigen die beiden folgenden Abbildungen auf der nächsten Seite zwei typische Beispiele für ungünstige Geländeformen aus der Praxis.

Die Abbildung 6-36 stellt die Umgebung des Testpunktes SCHEU3 im Testgebiet Scheuereck dar, die durch einen sehr gleichmäßig geneigten Hang mit wenig exponierten Stellen geprägt ist. Lediglich einige kleiner Geländeformen, wie beispielsweise Mulden oder größere Steine / Felsen sind zu sehen. Demgegenüber weist das in Abbildung 6-37 visualisierte Geländemodell um den Testpunkt STANG1 aus dem Testgebiet Schachtenau zwar einige sehr markante Geländeformen auf (z. B. Bachgraben mit Böschung, asphaltierte Strasse), allerdings können sie das Ergebnis nicht signifikant beeinflussen. Der Grund hierfür liegt in ihrer räumlichen Lage, die über eine größere Distanz durch eine gleichmäßige Geländeneigung in einer der Koordinatenrichtung geprägt ist. Da dies auch gleichzeitig die Verschiebungsrichtung beim DGMMatch ist, ergeben sich keine signifikanten Höhenunterschiede zwischen den Rasterpunkten. Dennoch kann es in der Praxis hilfreich sein, das DGM auf mögliche markante Punkte vorab zu untersuchen. Ein Vorschlag und die softwaretechnische Realisierung hierzu werden in Kap. 6.4.4.1 gegeben.

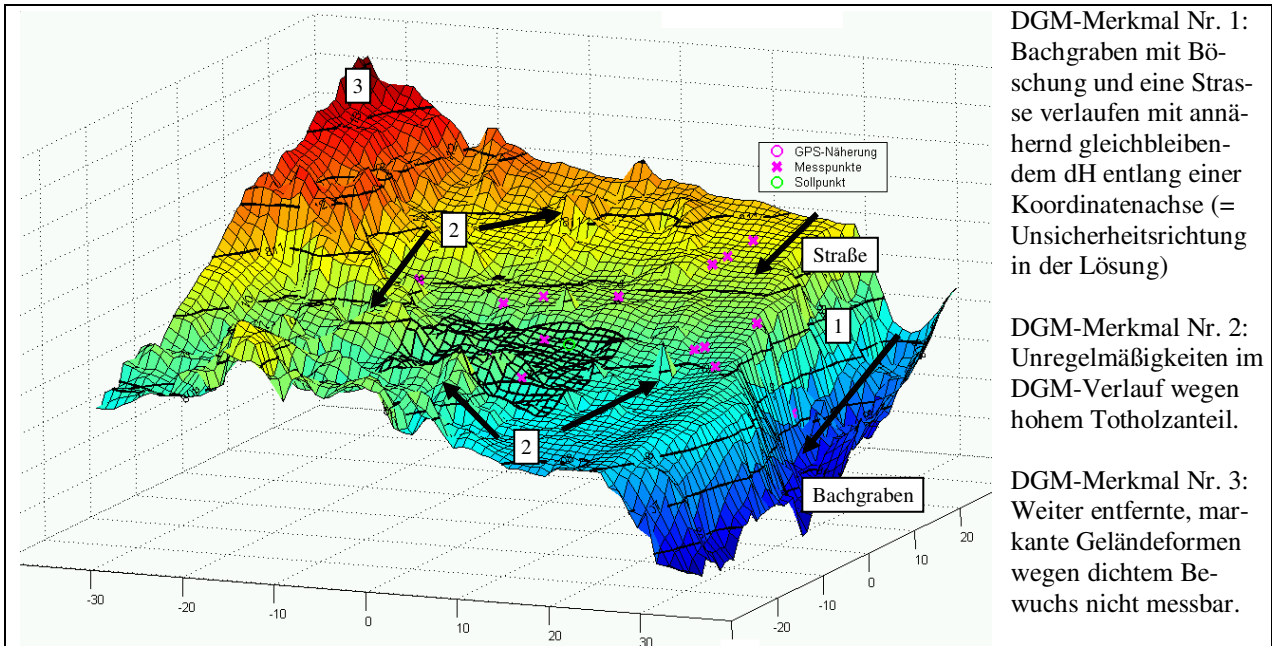


Abbildung 6-36: Einfluss Geländeform STANG1

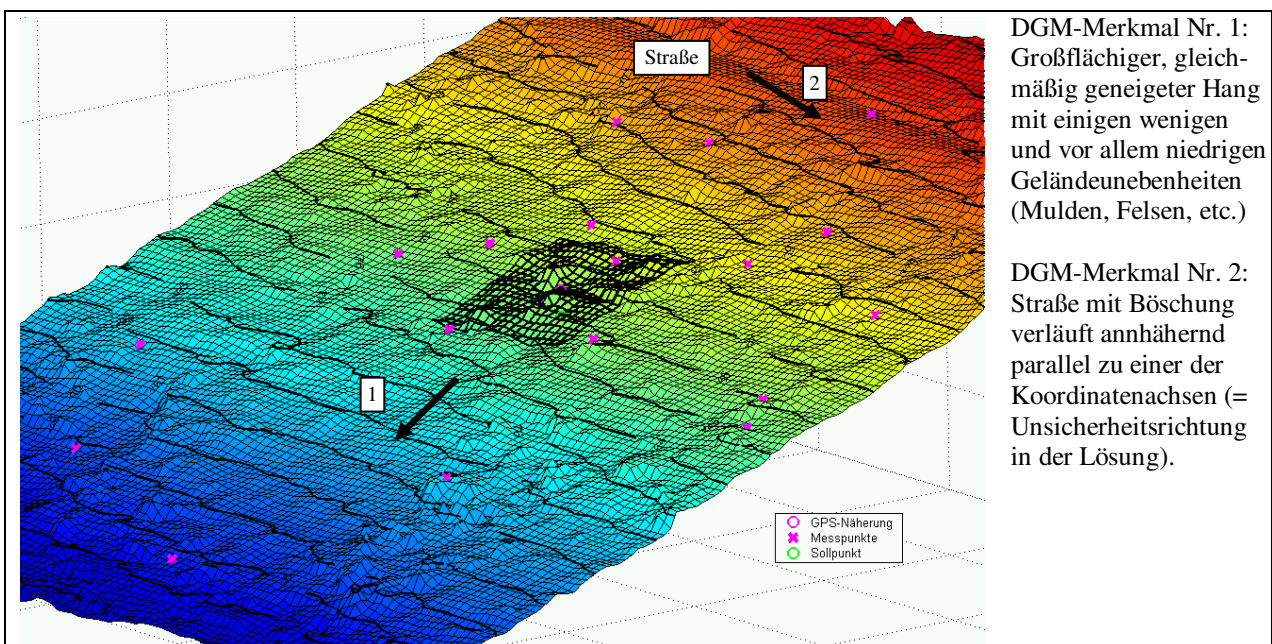


Abbildung 6-37: Einfluss Geländeform SCHEU3

☞ DGM-Qualität:

Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Anwendung des DGMMatch Verfahrens ist, dass der in der Natur vorliegende Geländeverlauf durch das DGM korrekt abgebildet wird. Im Modell dürfen keine Abbildungen von nicht-existierenden Geländeformen vorhanden sein (Fehlinterpretationen) und signifikante Geländepunkte müssen in Lage und Form korrekt abgebildet werden. Letzteres hängt wesentlich von der in die Modellberechnung einflussenden Anzahl von Messpunkten, dem Berechnungsfilter und der gewählten Auflösung des DGMs ab (s. auch Kap. 6.4.1.2). Bei dem im Rahmen dieser Arbeit verwendetem digitalem Geländemodell mit einer Rasterweite von 1 m und einer Messpunktdichte von durchschnittlich 5 Punkten pro m^2 kann von einer korrekten Objektdarstellung in der Größenordnung der DGM-Auflösung von 1 m (oder größer) ausgegangen werden. Diese Annahme wurde durch einen Vergleich von LRF-Messpunkten, bei denen die Objektmerkmale während der Messung notiert wurden, mit den an dieser Stelle im DGM dargestellten Objekten überprüft. Zusätzlich zu den bereits oben aufgeführten und kommentierten Beispielen zeigen die folgenden Abbildungen 6-38 und 6-39 weitere Ergebnisse dieses Vergleiches. Hierbei wird deutlich, dass das digitale Geländemodell Objekte ab dieser Größe relativ zuverlässig wiedergibt. Dagegen werden Objekte mit einer geringeren (3D-)Ausdehnung in vielen Fällen nicht mit einer ausreichenden Zuverlässigkeit dargestellt bzw. sind in dem „welligen“ Verlauf der digitalen Geländeoberfläche nicht eindeutig identifizierbar. Außerdem liegen immer wieder Fehlinterpretationen (s. Abb. 6-40) und in wenigen Fällen auch grobe Fehler im DGM vor (s. Abb. 6-41). Vor allem bei Totholzbeständen, dichtem Bewuchs, Baumstümpfen oder kleinräumig sehr stark veränderlichen Geländeformen kommt es zu falschen Darstellungen, die auf den ersten Blick gute (strukturierte) Verhältnisse vortäuschen oder aber in der Natur vorherrschende gute Bedingungen im Modell aufheben.

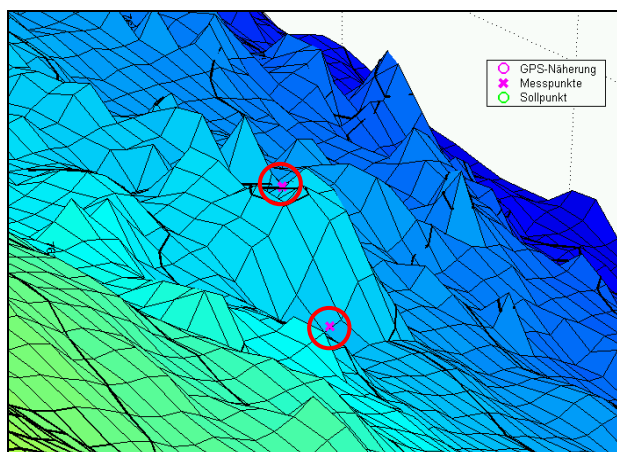


Abbildung 6-38: Darstellung u. Messung Fels (oben/unten)

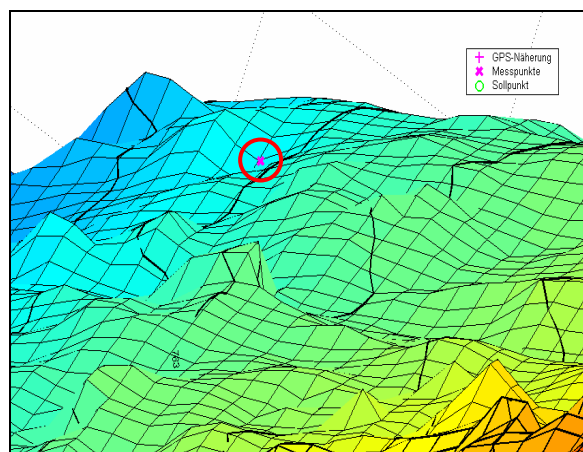


Abbildung 6-39: Darstellung und Messung Mulde

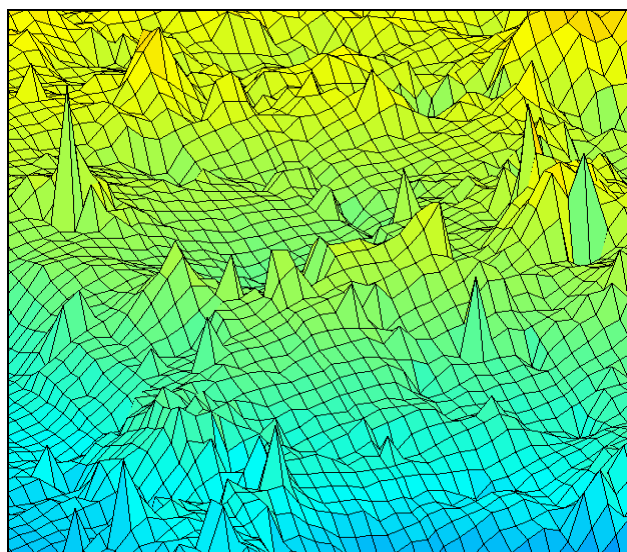


Abbildung 6-40: Fehlinterpretationen im DGM (Zacken)

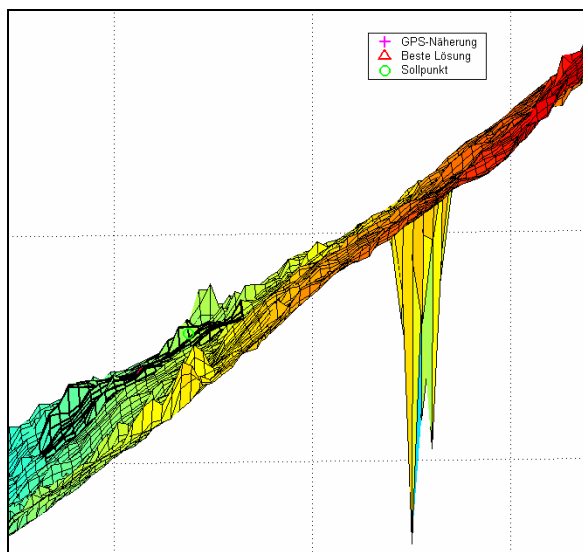


Abbildung 6-41: Grober DGM-Fehler (ca. 6 m)

☛ Genauigkeit der Näherungskoodinaten, Größe des Suchbereiches und Anzahl Zielpunkte:

Die Ergebnisse der Basisberechnung im Kap. 6.4.2.2 zeigen, dass eine Änderung der Näherungskoodinaten von $\pm 10\text{m}$ keinen erkennbaren Einfluss auf die Resultate des DGMMatch-Verfahrens hat. Dennoch ist der Näherungspunkt in Verbindung mit der gewählten Größe des Suchbereiches und der definierten Rasterweite zu beachten. Je ungenauer die Näherungskoodinaten eingeschätzt werden, desto größer muss der Suchbereich gewählt werden. Dadurch erhöht sich auf Grund der geringen Signifikanz der dH_m die Wahrscheinlichkeit, einen weit vom Sollpunkt entfernten Rasterpunkt mit einem geringen dH_m zu finden. Daher ist es sinnvoll, den Suchbereich möglichst klein, aber nicht kleiner als die geschätzte Genauigkeit der Näherung zu wählen. Außerdem ist die Anzahl der Zielpunkte pro Standpunkt zu beachten, denn dadurch werden automatisch auch die Verteilung und der Typ (Ebene, Böschung etc.) der verwendeten Geländepunkte sowie durch ihre Zielweite auch die Größe des verwendeten DGM-Ausschnittes beeinflusst.

6.4.4. Diskussion von Entscheidungshilfen und optimierten Auswertestrategien

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Aspekte sollen in diesem Kapitel aufgegriffen und daraus mögliche Strategien für eine optimierte DGMMatch-Auswertung formuliert sowie diskutiert werden.

6.4.4.1. Grafische und numerische Entscheidungshilfen

Zusätzliche Grafiken oder statistische Angaben können für den Anwender hilfreich sein, um das Ergebnis hinsichtlich Signifikanz bzw. bester Lösung besser bewerten zu können. Möglichkeiten hierfür sind:

☛ Visualisierung von Geländemerkmale:

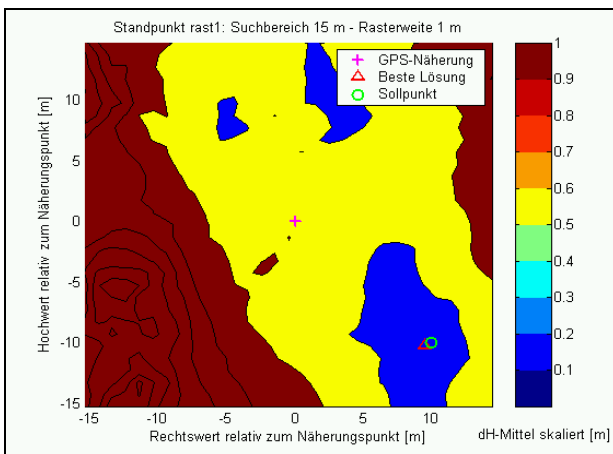


Abbildung 6-42: Entscheidungshilfe Kontur-Plot

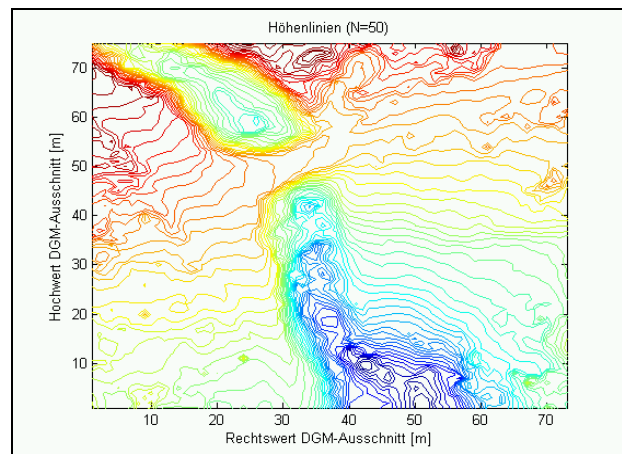


Abbildung 6-43: Entscheidungshilfe Höhenlinien

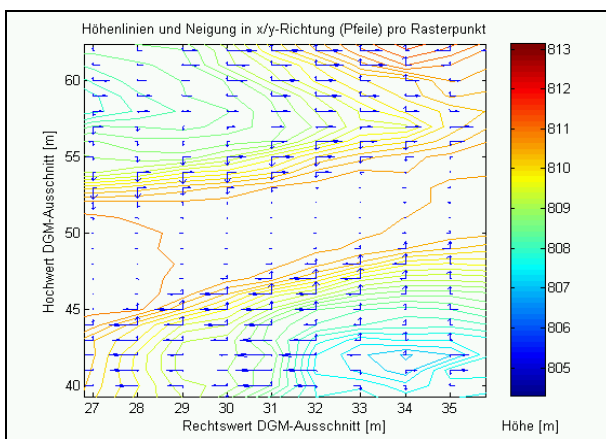


Abbildung 6-44: Entscheidungshilfe Neigung

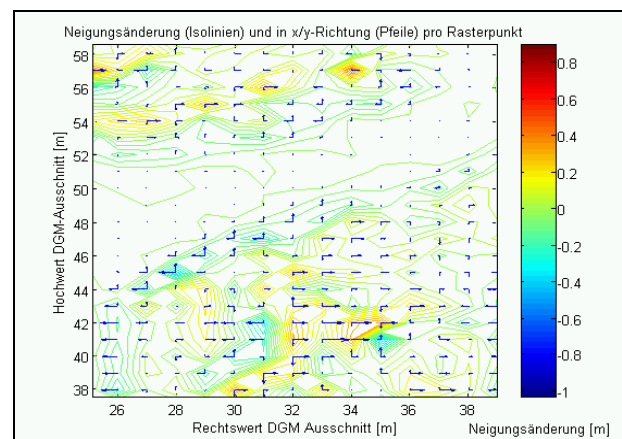


Abbildung 6-45: Entscheidungshilfe Neigungsänderung

Das zusätzliche Modul *neig* erlaubt auf Basis eines festen Suchbereiches von 15 m und einer Rasterweite von 1 m die Darstellung der dH_m als skalierten, und damit übersichtlicheren Kontour-Plot (0,9-1m = alle Werte $> 1\text{m}$), die Anzeige der Höhenlinien sowie die Visualisierung der Neigung (Pfeile) und Gradienten (Isolinien) in Richtung der Koordinatenachsen zwischen Rasterpunkten. Die Abbildungen 6-42 bis 6-45 zeigen den Bach- und Brückenbereich aus dem Testgebiet Schachtenau (Abb. 6-26, S. 125) als Beispiel.

Weitere Möglichkeiten das Gelände auf markante Merkmale hin zu untersuchen, bietet das im Rahmen dieser Arbeit realisierte Matlab Modul *profil*. Es erlaubt die Visualisierung von Profillinien eines digitalen Geländemodells, wie in den folgenden Abbildungen anhand eines DGM-Ausschnittes mit einem Forstweg aus dem Testgebiet Scheuereck dargestellt. Die hierfür notwendigen Profilpunkte können mit Hilfe der Maus direkt aus einem 2D-Kontour-Plot oder über eine Selektionsliste ausgewählt werden (s. Abb. 6-49). Zur Auswahl stehen die über eine LRF-Batch-Datei eingelesenen Soll-, Näherungs- und LRF-Geländemesspunkte. Zusätzlich zu diesen „gemessenen“ Profilpunkten werden nach Eingabe einer frei wählbaren Schrittweite von < 1m weitere Profilpunkte aus dem DGM interpoliert und zur Visualisierung der Profillinie verwendet, um auch den Geländerverlauf zwischen den gemessenen Punkten zu berücksichtigen. Bei der Ergebnisdarstellung kann der Anwender anschließend zwischen der Visualisierung des gewählten Profils mit oder ohne Angabe der ersten und zweiten Ableitung zur Verdeutlichung der vorherrschenden Neigung bzw. Neigungsänderung zwischen den Profilpunkten wählen (s. Abb. 6-46 und 6-47). Zusätzlich werden ebenso wie bei der DGMMatch-Basisberechnung der für die Profilberechnung verwendete DGM-Ausschnitt inklusive von Soll-, Näherungs- und LRF-Geländemesspunkten dreidimensional visualisiert (s. Abb. 6-48) sowie die Verteilung der LRF-Messpunkte in einem separaten Plot angezeigt (ohne Abbildung).

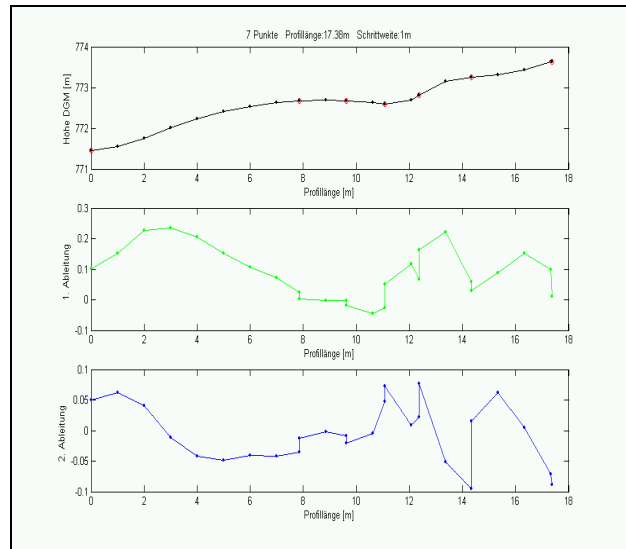


Abbildung 6-46: Profillinie mit Ableitungen

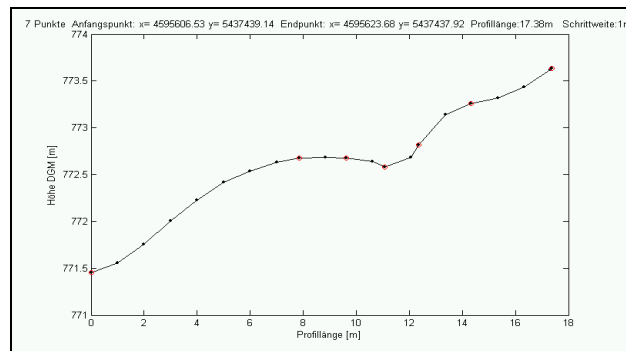


Abbildung 6-47: Profillinie ohne Ableitungen

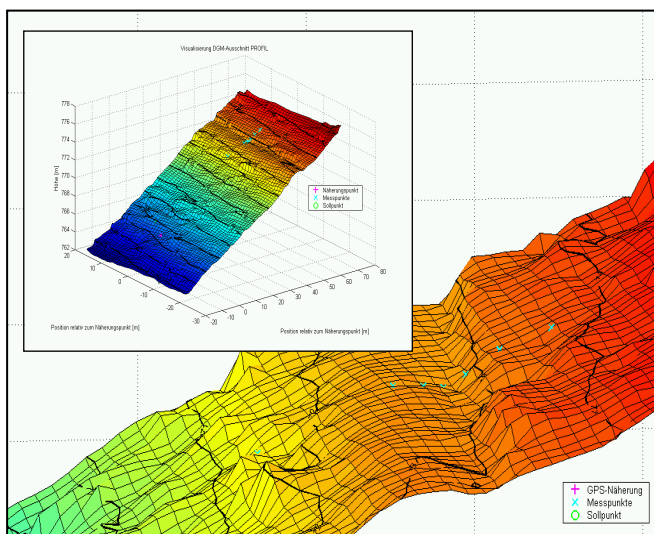


Abbildung 6-48: 3D-Visualisierung DGM-Ausschnitt *profil*

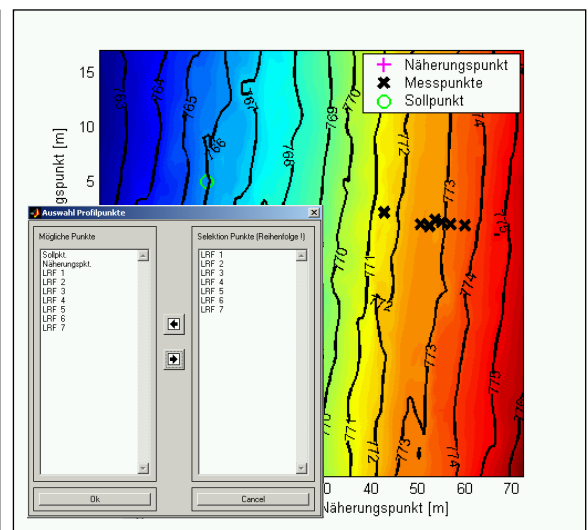


Abbildung 6-49: 2D-Kontour-Plot mit Selektionsliste

☞ Definition Lösungsraum um Näherungspunkt:

Um die Anzahl der möglichen Ergebnisse nach der Auswertung des gesamten Suchbereiches zu verringern, wird über die Eingabe einer geschätzten Lagegenauigkeit dL für den Näherungspunkt durch den Nutzer ein kleinerer Lösungsraum definiert. Dadurch werden nur noch Rasterpunkte im Abstand dL vom Näherungspunkt aus bei der weiteren Auswertung berücksichtigt. Dem Anwender kann dieser Bereich zusätzlich in Form eines skalierten Rasterplots der dH_m ($> 0,9$ m = braun) als weitere visuelle Entscheidungshilfe grafisch angezeigt werden (s. Abb. 6-50).

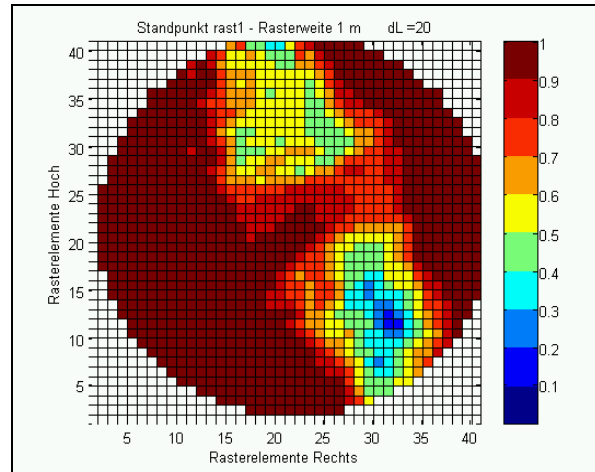


Abbildung 6-50: Entscheidungshilfe Lösungsraum

☞ Häufigkeitsverteilung und Grenzwert dH_m :

Durch die Angabe einer Häufigkeitsverteilung der berechneten dH -Mittel für das Intervall 0-1 m in Form eines Histogrammes (s. Abb. 6-51) sowie die Auflistung der numerischen Ergebnisse dieser Verteilung (s. Abb. 6-52) ergeben sich weitere visuelle und numerische Entscheidungshilfen bei der DGMMatch-Auswertung. Letztere dient in dem unten gezeigten Beispiel auch als Grundlage für die Eingabe eines dH_m -Grenzwertes, der als Steuerparameter für die sog. *Flecken-Lösung* benötigt wird (s. Kapitel 6.4.4.4).

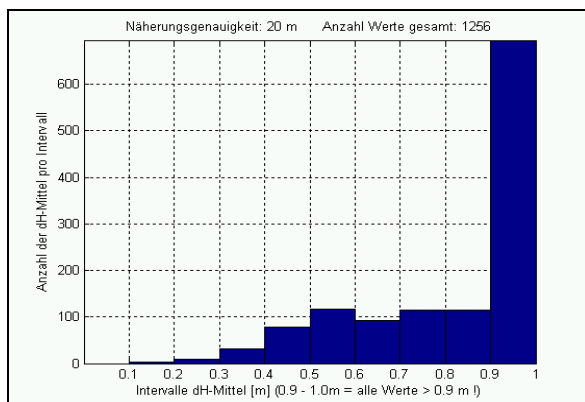


Abbildung 6-51: Entscheidungshilfe Histogramm

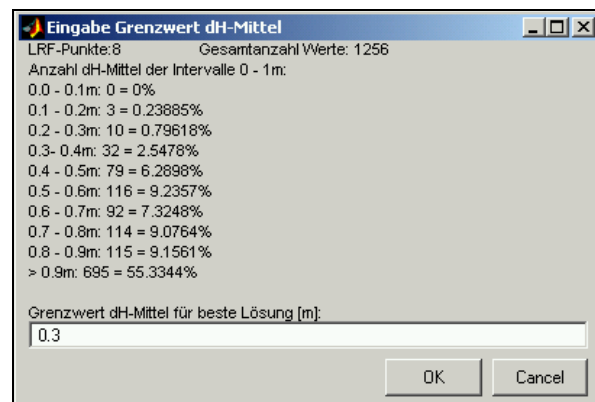


Abbildung 6-52: Entscheidungshilfe Grenzwert dH_m

6.4.4.2. AutoDGMMatch

Das Ziel der AutoDGMMatch-Auswertung ist es, durch sukzessives Verkleinern der Genauigkeit der Näherungskoodinaten, der Größe des Suchbereiches sowie der verwendeten Rasterweite die Wahrscheinlichkeit der Detektion von kleinen, aber weit entfernten dH_m zu verringern. Es handelt sich somit um ein iteratives Vorgehen, das im Rahmen dieser Arbeit mit den folgenden, automatisch hintereinander durchgeführten Bearbeitungsschritten (STEP) softwaretechnisch in Matlab umgesetzt wurde:

STEP1: Suchbereich 15 m (→ Genauigkeit Näherung < 15 m !), Rasterweite 1 m
Mittlung der fünf besten dH_m -Lösungen mit Überprüfung, ob die zugehörigen Rasterpunkte max. ± 5 m voneinander entfernt liegen. Das Mittel stellt den Näherungspunkt für den Bearbeitungsschritt STEP2 dar.

STEP2: Näherungspunkt aus STEP1, Suchbereich 7 m, Rasterweite 1m + 0.25 m
Gemeinsame Mittlung der jeweils fünf besten dH_m -Lösungen einer Rasterweite mit Überprüfung, ob die zugehörigen Rasterpunkte max. ± 2.5 m voneinander entfernt liegen. Das Mittel stellt den Näherungspunkt für den abschliessenden STEP3 dar.

STEP3: Näherungspunkt aus STEP2, Suchbereich 3 m, Rasterweite 1m + 0.25 m + 0.10 m
Gemeinsame Mittlung der jeweils fünf besten dH_m -Lösungen einer Rasterweite mit Überprüfung, ob die zugehörigen Rasterpunkte max. ± 1.5 m voneinander entfernt liegen (sog. *Lage-Check*).

Die Ergebnisdarstellung der AutoDGMMatch-Auswertung beinhaltet neben diversen alphanumerischen Angaben zu jedem Bearbeitungsschritt (s. Protokolldatei Basisberechnung in Kap. 6.4.2) auch einen skalierten Kontour-Plot der ausgewerteten dH-Mittel für jede berechnete Rasterweite sowie die grafische Darstellung der Höhenlinien, der Neigung, der Neigungsänderung und der 3D-Geländedarstellung für die Größe des Suchbereiches STEP1 als zusätzliche Entscheidungshilfe. Die Leistungsfähigkeit dieser Auswertestrategie wurde wiederum anhand der sechs Testpunkte untersucht. Die in der Tabelle 6-28 aufgeführten Ergebnisse verdeutlichen auch in diesem Fall das Potential des Verfahrens für eine Positionierungsgenauigkeit von 1 m und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei 17 von 30 Auswertungen liegt nach STEP3 eine Lageabweichung vom Sollpunkt (dL) von weniger als 1 m vor (57%). Von den restlichen 13 Lösungen weisen 9 Positionen eine Lageabweichung größer 1 m auf (max. 9 m) und in vier Fällen konnte keine Lösung gefunden werden, da hier der bei STEP1 oder STEP2 durchgeführte Lage-Check nicht erfüllt wurden. Die Abweichungen vom Sollpunkt in der Höhe (dH) sind in nahezu allen Fällen geringer als 0,5 m.
- Die Durchführung des Lage-Checks bei STEP3 führt bei 39% der noch möglichen Auswertungen zu einem besseren, in 17% der Fälle zu dem gleichen und bei 42% der Berechnungen zu einem schlechteren Ergebnis. Keine der Lösung wurden bei diesem Auswerteschritt noch verworfen.
- Der Einfluss der Zielpunkanzahl ist gering, da nur in einem Fall eine Verschlechterung des Ergebnisses bei einer geringeren Anzahl an Punkten auftritt. Die Ergebnisse der umfangreicheren Basisberechnung sprechen allerdings dafür, grundsätzlich möglichst viele Zielpunkte (> 10) für ein stabileres Ergebnis zu verwenden. Dies trifft vor allem bei wenig strukturierten Geländebereichen zu.
- Die Wahl der Genauigkeit der Näherungskordinaten (hier + 10 m / - 10 m) beeinflusste das Ergebnis in 20% der Fälle, und zwar jedes Mal dahingehend, dass keine Lösung möglich war. Dies unterstreicht die Bedeutung der Wahl des Näherungspunktes und führt zu der Empfehlung, die Auswertung mit veränderten Näherungskordinaten innerhalb des gewählten Suchbereiches zu wiederholen.

Punkt	Anzahl Zielpunkte	Näherung [m]	STEP1		STEP2		STEP3		mit Lage-Check		
			dL [m]	dH [m]	dL [m]	dH [m]	dL [m]	dH [m]	dL [m]	dL [m]	Lsg. weg
RAST1	10	+10	0,10	0,04	0,24	0,03	0,37	0,03	0,47	0,02	1
		-10	0,10	0,04	0,24	0,03	0,37	0,03	0,47	0,02	1
	8	+10	0,72	0,04	0,81	0,03	0,84	0,03	0,84	0,03	0
		-10	0,72	0,04	0,81	0,03	0,84	0,03	0,84	0,03	0
DICK1	6	+10	0,91	0,02	0,76	0,01	0,48	0,02	0,12	0,05	3
		-10	0,91	0,02	0,76	0,01	0,48	0,02	0,12	0,05	3
	10	+10	0,25	0,06	0,17	0,06	0,16	0,05	0,22	0,04	1
		-10	0,25	0,06	0,17	0,06	0,16	0,05	0,22	0,04	1
STANG1	16	+10	7,56	0,48	7,21	0,47	7,01	0,46	6,93	0,45	1
		-10	2,57	0,05	7,21	0,47	7,01	0,46	6,93	0,45	1
	8	+10	6,98	0,46	6,91	0,46	6,81	0,45	6,83	0,45	2
		-10	0,59	0,01	6,91	0,46	6,81	0,45	6,83	0,45	2
SCHEU3	20	+10	0,49	0,14	0,46	0,13	0,42	0,13	0,42	0,13	0
		-10	0,49	0,14	0,46	0,13	0,42	0,13	0,42	0,13	0
	11	+10	0,71	0,20	0,77	0,18	0,83	0,17	0,83	0,18	0
		-10	keine Lösung		-	-	-	-	-	-	-
	7	+10	0,69	0,13	0,79	0,11	0,92	0,10	0,97	0,10	2
		-10	0,69	0,13	0,79	0,11	0,92	0,10	0,97	0,10	2
SCHEU6	17	+10	3,83	0,59	3,19	0,49	2,73	0,38	2,08	0,17	7
		-10	3,83	0,59	3,19	0,49	2,73	0,38	2,08	0,17	7
	11	+10	4,76	0,52	2,68	0,38	2,43	0,31	2,13	0,20	4
		-10	3,73	0,61	2,68	0,38	2,43	0,31	2,13	0,20	4
	6	+10	keine Lösung		-	-	-	-	-	-	-
		-10	1,88	0,34	keine Lösung		-	-	-	-	-
MISCH2	17	+10	2,03	0,16	0,94	0,20	0,52	0,24	0,46	0,26	3
		-10	2,03	0,16	0,94	0,20	0,52	0,24	0,46	0,26	3
	5	+10	3,91	0,09	2,04	0,16	0,81	0,21	0,86	0,23	2
		-10	2,95	0,14	2,04	0,16	0,81	0,21	0,86	0,23	2
	4	+10	1,21	0,35	keine Lösung		-	-	-	-	-
		-10	7,20	1,40	8,65	1,62	8,71	1,70	8,95	1,78	4

Tabelle 6-28: Ergebnisse AutoDGMMatch

6.4.4.3. Zusatzbedingungen

Eine weitere Überlegung das Ergebnis der DGMMatch-Auswertung signifikanter zu gestalten, bestand in der Messung und Auswertung von linien- oder flächenförmigen Objekten anstatt von einzelnen Punkten. Durch die Vorgabe einer bestimmten Anordnung (z. B. zwei sich im Standpunkt kreuzende Profile) sollten zusätzliche Bedingungen definiert werden, die bei der Auswertung, beispielsweise mit Hilfe von Kreuzkorrelationsverfahren, zu berücksichtigen sind und die Signifikanz steigern. Allerdings ergaben sich in der Umsetzung schon bei der Aufnahme Probleme, so dass diese Variante als nicht praxistauglich eingestuft wird. So ist es auf Grund der Sichtbehinderung durch Bäume kaum möglich, zwei längere und vor allem geradlinige Profile zu messen oder ein größeres, flächenförmiges Objekt formgetreu aufzunehmen. Weiterhin wird für ein signifikantes Ergebnis bei Korrelationsverfahren eine möglichst hohe Punktzahl empfohlen. Dies führt in der Praxis zu einem sehr hohen Messaufwand bei größeren Objekten, die bei den hier zur Verfügung stehenden DGMs mit einer Rasterweite von 1m auch notwendig sind.

6.4.4.4. Flecken-Lösung

Die Ergebnisse der Basisberechnung haben gezeigt, dass die wahrscheinlichste Positionslösung nicht nur durch den Idealfall eines einzelnen Rasterpunktes mit dem eindeutig kleinsten dH_m gegenüber seinen Nachbarpunkten gekennzeichnet ist, sondern oft auch mehrere sowohl räumlich als auch dem Betrag nach nah zusammenliegende dH_m -Werte auf die gesuchte Position hindeuten. Die Ursache hierfür sind die häufig vorkommenden fließenden Übergängen von Geländeformen im näheren Umkreis der Zielpunkte sowie die Ungenauigkeiten im DGM und in den Messwerten. Die Grundidee der sog. *Flecken-Lösung* besteht nun darin, diese benachbarten Rasterpunkte mit niedrigem dH_m zu identifizieren und daraus eine gemeinsame Lösung abzuleiten (z. B. Schwerpunkt des Flecks). Das Ziel ist, durch diese mehr flächenbezogene Lösung, ein signifikanteres Ergebnis als mit dem bisherigen, nur auf einzelnen Rasterpunkten basierenden Ansatz zu erhalten. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass mit der Größe der Flecken auch die Unsicherheit der Lösung wächst. Das Ergebnis einer Flecken-Lösung kann somit nur ein Kompromiss zwischen Signifikanz und räumlicher Genauigkeit darstellen.

Da die Größenordnung, Qualität und Verteilung der berechneten dH_m und der daraus abgeleiteten Flecken stark von messpunkt- und auswertespezifischen Faktoren abhängen, ist keine starre Definition und Bewertung der Flecken möglich. Vielmehr ist ein Mindestmaß an (subjektiver) Bewertung durch den Anwender notwendig, welches in diesem Fall über die Eingabe des Grenzwertes dH_{grenz} nach der Visualisierung der dH_m -Häufigkeitsverteilung (s. Kap. 6.4.4.1) realisiert wurde. Erst dann erfolgt die Fleckenbildung über alle im Lösungsraum vorhandenen Rasterpunkte unter Berücksichtigung von $dH_m < dH_{grenz}$ und einer *4-Kanten-Nachbarschaft*. Diese erfordert die Berührung von Rasterelementen eines Flecks an mindestens einer der vier Seitenkanten. Das Positionsergebnis eines so gebildeten Flecks ergibt sich aus dem Koordinatenschwerpunkt aller am Fleck beteiligten Rasterelemente. Um hier den Einfluss der Flecken-Geometrie zu senken und die Bedeutung der Rasterpunkte mit einem niedrigen dH_m zu erhöhen, wurden verschiedene Gewichtsfunktionen für die Berechnung eines gewichteten Mittels eingeführt und analysiert (s. Abb. 6-53). Die Ergebnisse zeigen aber, dass sich nur die letzten beiden Ansätze für eine Gewichtung

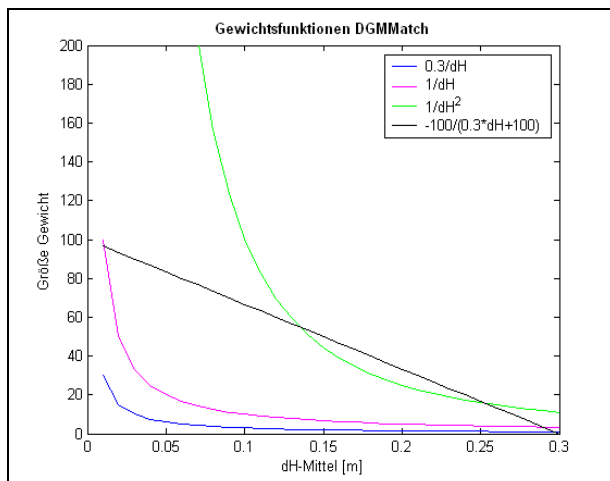


Abbildung 6-53: Gewichtungsfunktionen Fleckschwerpunkt

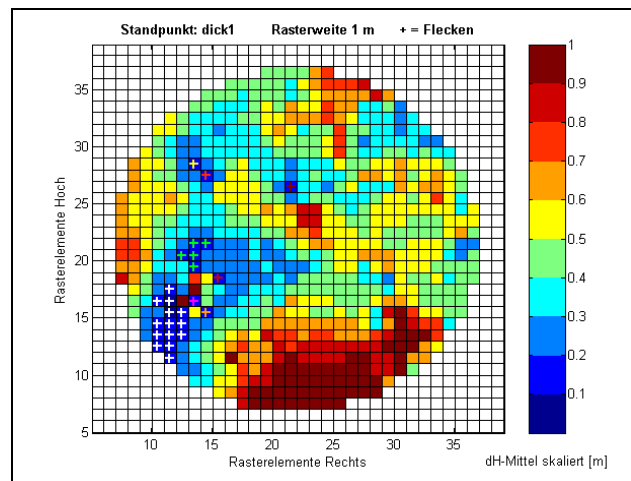


Abbildung 6-54: Beispiel Fleckenlösung

eignen und diese sich auch nur bei vielen Rasterelementen, also großen Flecken, oder sehr unterschiedlichen dH_m -Werten signifikant auswirken. So lagen beispielsweise die Unterschiede im Positionsergebnis bei den ausgewerteten Testpunkten nur im Bereich von $\pm 0,3$ m. Neben der von der DGMMatch-Basisberechnung bekannten Ergebnisdarstellung werden bei der Flecken-Lösung zusätzlich die dH_m -Häufigkeitsverteilung und die Fleckenbildung in einem Rasterplot dargestellt (s. Abb. 6-54) sowie die numerischen Ergebnisse mit diverse Zusatzinformationen protokolliert, wie folgendes Beispiel zeigt:

```
-----Lösungen Flecken sortiert nach kleinstem dH_Mittel-----
UNGEWICHTETE Lösungen für die Flecken mit dH-Mittel <0.30 [m] um die Näherung + dL <=15.00 [m]:
1-bester Fleck: R 4595568.800  H 5437441.000  Z 765.972
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 0.904  dH = 0.222
Lösung basiert auf 15/703 Rasterpunkt(en)  Mittleres dH: 0.242 [m]  Stabw. des Mittels: 0.004 [m]  Stabw. dH einzeln: 0.054 [m]
Anzahl der verwendeten LRF-Punkte für die dH-Mittel (Min./Max.): 7/7 von max. 7 LRF-Strahlen
2-bester Fleck: R 4595564.000  H 5437429.000  Z 765.900
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 13.792  dH = 0.150
Lösung basiert auf 1/703 Rasterpunkt(en)  Mittleres dH: 0.285 [m]  Stabw. des Mittels: 0.000 [m]  Stabw. dH einzeln: 0.000 [m]
Anzahl der verwendeten LRF-Punkte für die dH-Mittel (Min./Max.): 7/7 von max. 7 LRF-Strahlen
Lageabweichung der beiden besten Lösungen [m]= 12.924  Differenz der dH_Mittel [m]= 0.044

GEWICHTETE Lösungen mit P=1/dH^2:
1-bester Fleck: R 4595568.613  H 5437441.449  Z 765.911
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 0.524  dH = 0.161
2-bester Fleck: R 4595564.000  H 5437429.000  Z 765.900
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 13.792  dH = 0.150

GEWICHTETE Lösungen mit P=-100/dH_grenz*dH+100:
1-bester Fleck: R 4595568.565  H 5437441.638  Z 765.892
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 0.410  dH = 0.142
2-bester Fleck: R 4595564.000  H 5437429.000  Z 765.900
*Absolute Ablage Sollpunkt - Mittel Fleck [m]: dL = 13.792  dH = 0.150
```

Auch an dieser Stelle sei angemerkt, dass die hier speziell für die Verfahrensanalyse aufgeführten Sollpunkt-bezogenen Informationen im späteren Praxiseinsatz nicht zur Verfügung stehen würden (* Zeilen). Stattdessen kann der Anwender nur auf die Zusatzinformationen und Entscheidungshilfen eines strategie-optimierten DGMMatch-Verfahrens zurückgreifen, welches zusammen mit den aus der Flecken-Lösung resultierenden Ergebnissen im Kapitel 6.4.5 vorgestellt und erläutert wird. Wie aber oben bereits erwähnt, verlangt diese Strategie auf jeden Fall eine sorgfältige Prüfung aller bereitgestellten Informationen durch den Nutzer für die Festlegung der endgültigen Resultate. Vor allem bei Lösungen mit mehreren Flecken sind die Ergebnisse immer bzgl. der *Anzahl an Rasterpunkten pro Fleck*, der *Form und Ausdehnung der Flecken* sowie der *absoluten Lage der Flecken* (wie passt Lösung zu dem DGM?) kritisch zu prüfen.

6.4.4.5. MultiDGMMatch

Bei diesem Ansatz handelt es sich um eine Erweiterung der Flecken-Lösung, die bei der Berechnung des wahrscheinlichsten Positionsergebnisses zusätzliche, vom Nutzer bereitgestellte, standpunktbezogenen Informationen berücksichtigt. Dies können beispielsweise die Entfernung und/oder Richtung zwischen den unbekanntem LRF-Standpunkten sein, die während der Punktaufnahme im Gelände bei ausreichendem Sichtkontakt direkt mitbestimmt werden. Ziel ist es, durch die Einführung dieser Restriktionen, die Signifikanz der Ergebnisse durch gegenseitige Stützung zu steigern. Daraus ergibt sich folgende Strategie für die Auswertung, die als *MultiDGMMatch*-Verfahren bezeichnet wird (s. auch Abb. 6-55 und 6-56):

1. Sequentielle DGMMatch-Berechnung mit Flecken-Lösung für jeden einzelnen Standpunkt.
Lösung pro Standpunkt sind die gewichteten / ungewichteten Schwerpunkte der x-besten Flecken (Kriterium = kleinstes Mittel aller dH_m -Werte eines Flecks)
2. Eingabe der sog. *Richtungs- und/oder Entfernungsrestriktionen* zwischen den einzelnen Punkten
3. Sequentieller Vergleich der aus den Positionsergebnissen (Schwerpunkten) der ungewichteten Flecken zweier Standpunkte berechneten Entfernungen und/oder Richtungen mit den vorgegebenen Restriktionen.
4. Ausgabe der Ergebnisse in alphanumerischer Form in der Reihenfolge der Flecken pro Standpunkt

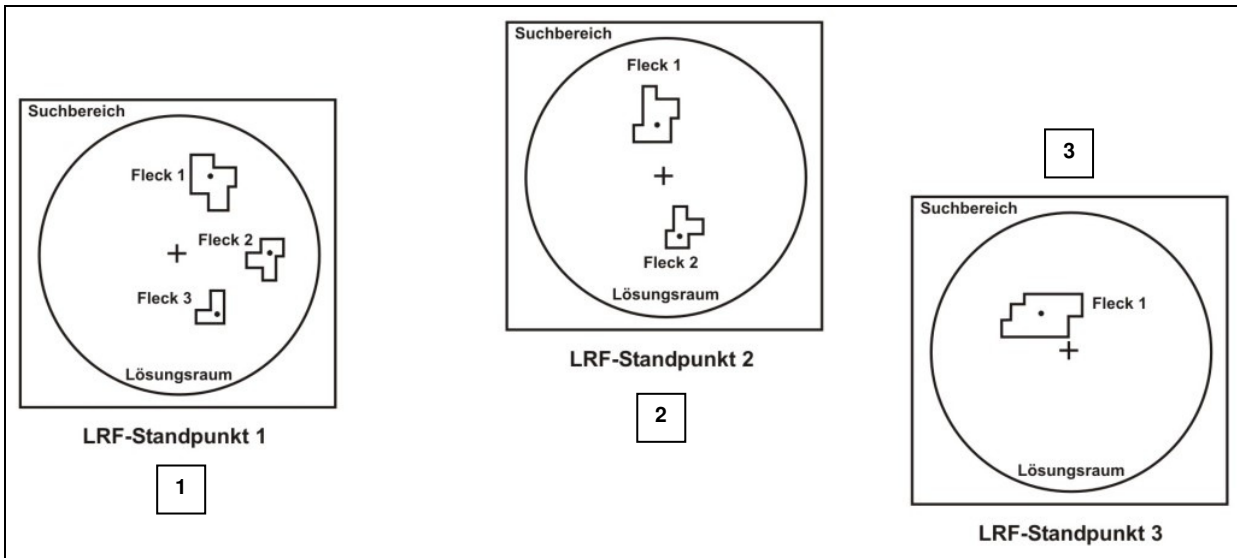


Abbildung 6-55: Sequentielle DGMMatch-Berechnung mit Flecken-Lösung pro Standpunkt

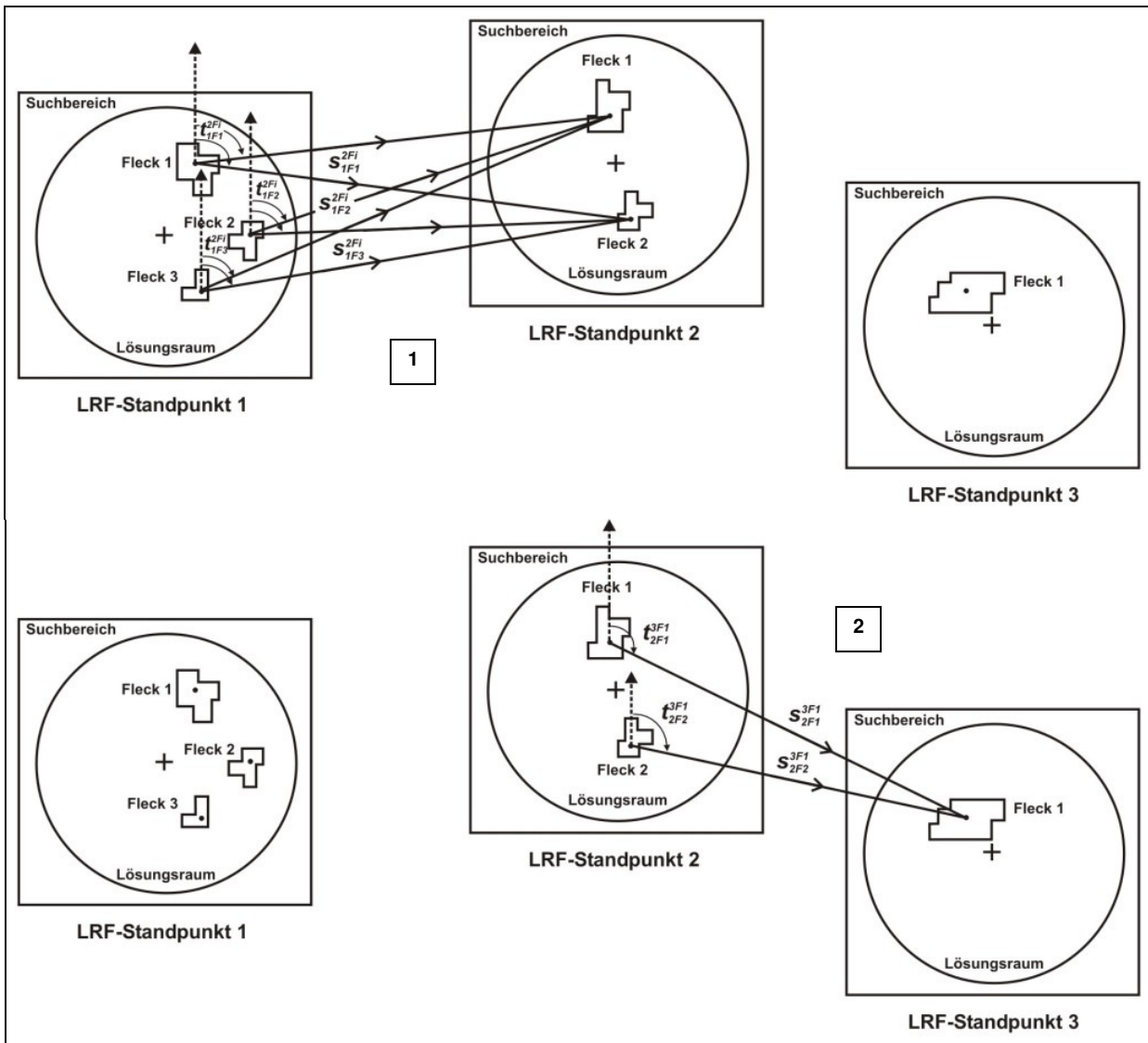


Abbildung 6-56: Sequentieller Vergleich der Positionsergebnisse (Schwerpunkte Flecken)

Die Ergebnisse der MultiDGMMatch-Berechnung beinhalten die in dem folgenden Beispiel aufgeführten Informationen. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass die Angaben zum wahren Lagefehler im späteren Praxiseinsatz auf Grund der Unkenntnis der Sollposition nicht zur Verfügung stehen würden (* Zeilen):

1. Fleck auf stang1 mit Schwerpunkt RW= 4604539.000 und HW= 5424144.000

*Lagefehler dieses Schwerpunkts : 8.448 m

1. Fleck auf rast1 mit Schwerpunkt RW= 4604583.000 und HW= 5424157.000

*Lagefehler dieses Schwerpunkts : 4.488 m

Differenz zum Sollabstand : dS = 4.120 m = 8.24 %

Richtungsabweichung der Sollstrecke: dR = 15.513 gon -> 8.beste Abweichung entspricht einer Querabweichung von 12.431 m

Mittleres dH aus beiden Inseln : dH = 0.277 m -> 5.bestes dH

Abweichung vom besten dH : 0.032 m

*Lagefehler beider Schwerpunkte : 12.936 m

2. Fleck auf rast1 mit Schwerpunkt RW= 4604584.333 und HW= 5424161.333

*Lagefehler dieses Schwerpunkts : 0.196 m

Differenz zum Sollabstand : dS = 1.466 m = 2.93 %

Richtungsabweichung der Sollstrecke: dR = 10.553 gon -> 6.beste Abweichung entspricht einer Querabweichung von 8.365 m

Mittleres dH aus beiden Inseln : dH = 0.245 m -> 1.bestes dH

Abweichung vom besten dH : 0.000 m

*Lagefehler beider Schwerpunkte : 8.644 m

2. Fleck auf stang1 mit Schwerpunkt RW= 4604540.833 und HW= 5424140.917

Lagefehler dieses Schwerpunkts : 5.061 m

1. Fleck auf rast1 mit Schwerpunkt RW= 4604583.000 und HW= 5424157.000

usw.

Das Potential dieser Auswertestrategie deutet sich bei den in der Tabelle 6-29 aufgeführten Ergebnissen an. So wird mit Hilfe des Kriteriums „kleinstes dS“ in 78 % der Fälle die in einem Durchlauf bestmögliche Positionslösung identifiziert. Deren Genauigkeit hängt wie bei allen anderen Auswertestrategien vor allem von der Qualität des DGMs ab. Allerdings ist auch hier die Signifikanz bei vielen Lösungen gering, da sich die Werte von dS bei räumlich stark getrennten Lösungen kaum unterscheiden. Die Hinzunahme der Richtungsabweichung dR als weiteres Kriterium unterstützt das richtige Ergebnis zumindest in 6 von 9 Fällen, während das mittlere dH der Flecken auf Grund der sehr geringen Unterschiede nicht brauchbar ist. Als hilfreich hat sich bei Auswertungen von Punktepaaren mit jeweils einem gemeinsamen Standpunkt die gegenseitige Stützung der Lösungen erwiesen. So führte die eindeutige und korrekte Lösung von RAST1 durch logischen Ausschluss bestimmter Flecken bei STANG1 zu einem zuverlässigeren Ergebnis. Trotz dieser positiven Ergebnisse bleibt festzuhalten, dass auch bei dieser Auswertestrategie noch ein hoher Anteil an nutzerbasierter Bewertung notwendig ist und die hier diskutierten Testdurchläufe nur eine Tendenz angeben können. Auf Grund der zahlreichen Einflussparameter sind für eindeutigere Aussagen noch umfangreichere Auswertungen notwendig. Man kann aber davon ausgehen, dass mit dieser Auswertestrategie grobe Positionsfehler (> 5m) recht zuverlässig abgefangen werden können.

Nr	Testpunkte	DGM Qualität	Genauigkeit Näherung [m]	Anzahl Zielpkt. / Flecken	dLage Flecken [m]	dHöhe Flecken [m]	Genauig. Restriktion [m]	Lösung bestes dS: dS / dH / dR dLage / dHöhe	Beste Lösung dL: dS / dH / dR dLage / dHöhe
1	DICK1	mittel	-10 / -10 / 10	10 / 4	1,85 – 5,65	0,07 – 0,54	0,03	0,13 / 0,195 / 4,94 gon 2,04 / 0,06	- || -
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	6 / 2	0,20 – 4,49	0,02 – 0,68			
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	6 / 2	0,20 – 4,49	0,02 – 0,68	0,06	1,06 / 0,283 / 1,35 gon 9,04 / 0,68	2,43 / 0,251 / 4,98 gon 4,74 / 0,23
	STANG1	schlecht	10 / 10 / 10	6 / 4	4,55 – 8,45	0,22 – 0,53			
2	DICK1	mittel	-10 / -10 / 10	10 / 4	1,85 – 5,65	0,07 – 0,54	0,03	0,13 / 0,195 / 4,94 gon 2,04 / 0,06	- || -
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	6 / 2	0,20 – 4,49	0,02 – 0,68			
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	6 / 2	0,20 – 4,49	0,02 – 0,68	0,06	3,33 / 0,212 / 9,58 gon 8,32 / 0,56	- || -
	STANG1	schlecht	10 / 10 / 10	6 / 1	8,13	0,56			
3	SCHEU3	gut	10 / 10 / 10	6 / 1	0,71	0,16	0,01	1,75 / 0,135 / 0,75 gon 4,20 / 0,20	- || -
	SCHEU6	mittel	10 / 10 / 10	8 / 4	3,45 – 12,6	0,20 – 1,61			
4	SCHEU3	gut	10 / 10 / 10	6 / 1	0,71	0,16	0,01	1,75 / 0,135 / 0,75 gon 4,20 / 0,20	- || -
	SCHEU6	mittel	-10 / -10 / 10	8 / 3	3,45 – 10,2	0,20 – 1,16			
5	DICK1	mittel	-10 / -10 / 10	10 / 4	1,85 – 5,65	0,06 – 0,54	0,03	0,13 / 0,195 / 4,94 gon 2,04 / 0,06	- || -
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	17 / 1	0,20	0,02			
	RAST1	sehr gut	-10 / -10 / 10	17 / 1	0,20	0,02	0,06	1,04 / 0,218 / 4,58 gon 4,06 / 0,12	- || -
	STANG1	schlecht	10 / 10 / 10	16 / 2	3,87 – 12,7	0,12 < 0,66			
6	SCHEU3	gut	10 / 10 / 10	20 / 1	0,58	0,19	0,01	0,74 / 0,167 / 2,05 gon 6,52 / 1,01	2,47 / 0,167 / 0,23 gon 2,57 / 0,19
	SCHEU6	mittel	-10 / -10 / 10	17 / 4	1,99 – 17,7	0,01 – 1,01			

Tabelle 6-29: Ergebnisse MultiDGMMatch

6.4.5. Definition und Bewertung eines strategioptimierten DGMMatch-Verfahrens

Nach der detaillierten Beschreibung der Basisberechnung, der Darstellung relevanter Einflussgrößen sowie der Diskussion von diversen Entscheidungshilfen und optimierten Auswertestrategien werden diese umfangreichen, aber für eine erfolgreiche (aktuelle und zukünftige) Methodenentwicklung bewusst aufgeführten Informationen, in diesem Kapitel durch die Definition und Bewertung eines strategioptimierten Verfahrensablauf übersichtlich zusammengefasst und der aktuelle Status des Verfahrens dokumentiert.

6.4.5.1. DGMMatch Version 1.65

Der derzeit favorisierte und gegenüber der Basisberechnung (s. Kap. 6.4.2.2) optimierte Verfahrensablauf einer DGMMatch-Auswertung ist in der Abbildung 6-57 dargestellt und entspricht der Programmversion 1.65. Dieser beinhaltet keinen automatischen Programmablauf, wie z.B. beim AutoDGMMatch realisiert, da derzeit noch kein ausreichend signifikantes Kriterium für die Bewertung der Ergebnisse vorliegt und daher immer eine umfassende (subjektive) Bewertung durch den Nutzer mit Hilfe der alphanumerischen und grafischen Entscheidungshilfen notwendig ist. Liegen zusätzliche Restriktionen in Form von Sollstrecken oder Sollrichtungen zwischen den Standpunkten vor, dann ist ein Vorgehen gemäß der Multi-DGMMatch-Auswärtstrategie zu empfehlen, wodurch der nach Standpunkten getrennten Auswertevorgang der Version 1.65 noch um zusätzliche, standpunktübergreifende Auswertungen ergänzt wird. Alle in dem folgenden Flussdiagramm aufgeführten Module bzw. Ein- und Ausgaben entsprechen den Beschreibungen in den vorhergehenden Kapiteln.

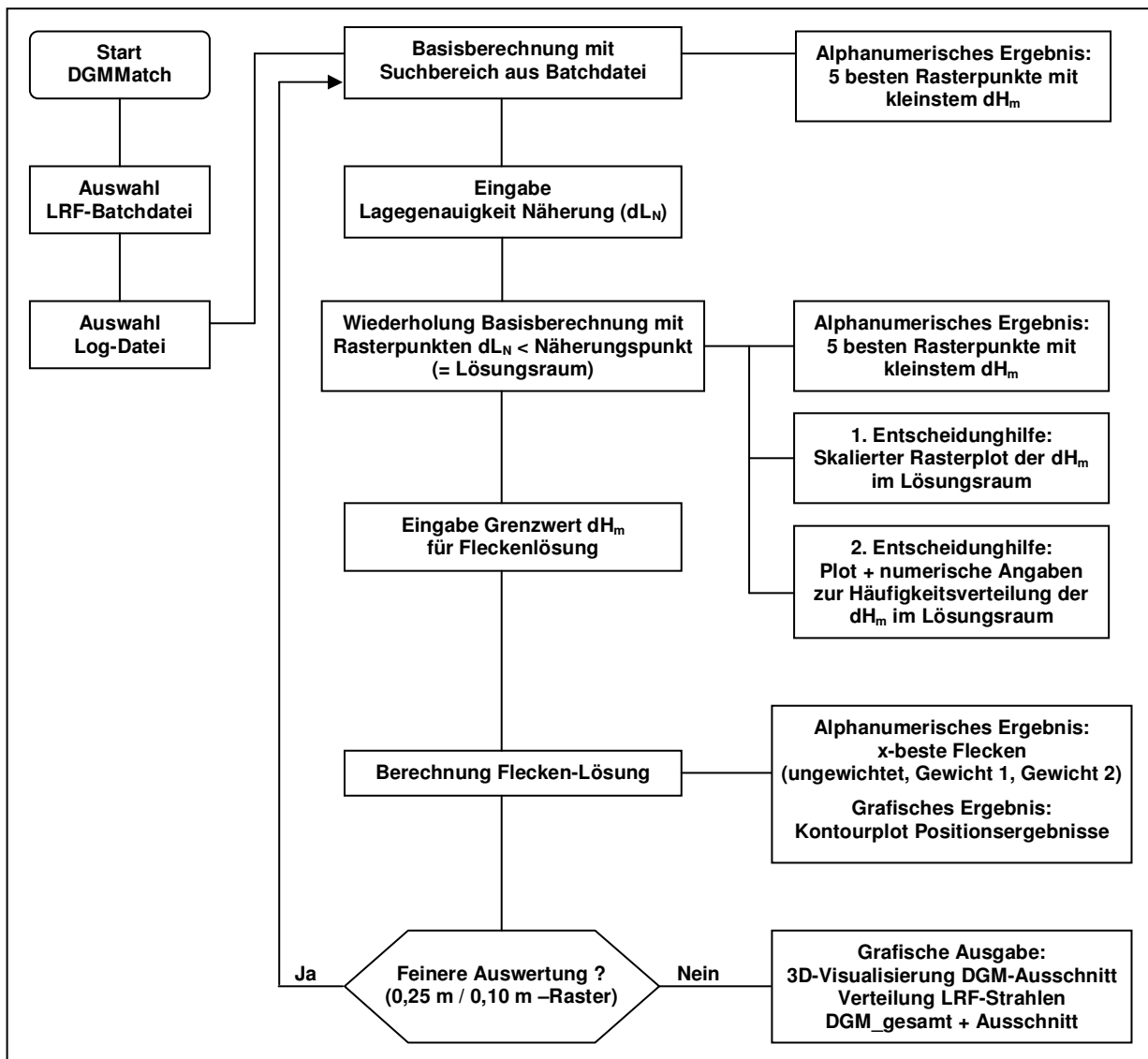


Abbildung 6-57: Flussdiagramm DGMMatch V1.65

6.4.5.2. Ergebnisse Testberechnungen

Die Leistungsfähigkeit des strategieoptimierten DGMMatch-Verfahrens kann anhand der in Tabelle 6-30 aufgeführten Berechnungsergebnisse verdeutlicht werden. Diese sog. „Großraum“-Versuche beinhalten ausnahmslos nur ungewichtete Positionsberechnungen im 1 m-Raster und mit einem großen Suchbereich von 50 bis max. 200 m. Durch diese hohe Anzahl an Rasterpunkte nimmt die Wahrscheinlichkeit von grob falschen Lösungen durch weiter entfernte Lösungspunkte und die notwendige Rechenzeit stark zu, so dass sich daraus Hinweise bzgl. der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ergeben.

Punkt + DGM-Qualität	Genauigk. Näherung [m]	Größe Suchb. [m]	Anz. Ziel-pkt.	Einzelpunkt		Flecken-Lösung (ungewichtet)							Rechenzeit [min.]	
				dL [m]	dH [m]	dH _m -Grenz	Punkte Flecken/gesamt	Anzahl Flecken	Fl. Nr.	Anz. Pkt.	dL [m]	dH [m]		dH _m [m]
RAST1 sehr gutes DGM	-20,+20	100	6	116,9	8,3	0,3	12 / 31422	4	1	4	0,2	0,1	0,247	18'
									2	4	116,6	8,3	0,250	
									3	2	4,5	0,7	0,271	
									4	2	38,9	3,1	0,275	
	-20,+20	80	6	0,6	0,1	0,3	8 / 20110	3	1	4	0,2	0,1	0,247	11'
									2	2	4,5	0,7	0,271	
-20,+20	80	12	0,6	0,1	0,3	12 / 20110	1	1	12	0,6	0,1	0,246	11'	
DICK1 mittleres DGM	-20,-20	80	10	0,4	0,0	0,2	25 / 20113	4	1	16	1,8	0,1	0,160	10'
									2	5	5,8	0,5	0,177	
									3	2	1,9	0,3	0,181	
									4	2	2,6	0,3	0,184	
SCHEU3 mittleres DGM	+20,+20	200	6	46,1	1,3	0,2	52 / 125657	32	1	2	15,0	1,7	0,161	255'
									2	4	19,6	2,0	0,163	
									3	2	89,0	8,0	0,170	
									
									7	4	0,7	0,2	0,176	
									
									10	4	111,1	1,6	0,182	
	...	...	Rest	>15 m									
	+20,+20	50	6	46,1	1,3	0,2	31 / 7849	15	1	2	15,0	1,7	0,161	4'
									2	4	19,6	2,0	0,163	
									
									6	2	0,7	0,2	0,176	
									7	2	15,6	0,0	0,180	
	...	...	Rest	>16 m									
	+20,+20	50	11	0,9	0,1	0,2	71 / 7849	13	1	2	47,3	0,9	0,166	4'
									2	7	65,4	2,0	0,171	
									3	9	0,1	0,1	0,171	
									...	...	Rest	>9 m	
	+20,+20	180	12	0,9	0,1	0,2	30 / 101786	11	1	9	0,2	0,1	0,158	192'
2									10	18,5	1,9	0,176		
...									...	Rest	>14 m			
MISCH2 mittleres DGM	-30,-50	120	5	0,7	0,4	0,4	9 / 45249	3	1	2	2,0	0,4	0,338	45'
									2	5	0,3	0,5	0,350	
									3	2	1,9	0,2	0,369	
	-30,-50	120	10	0,7	0,4	0,3	27 / 45249	4	1	21	2,3	0,1	0,251	50'
2									2	0,9	0,5	0,280		
3									2	4,8	0,2	0,294		
4									2	11,5	0,6	0,294		

Tabelle 6-30: Ergebnisse DGMMatch V1.65

Die Zusammenfassung und Analyse der Berechnungsergebnisse mit der Version 1.65 ergibt:

- Auch bei großen Suchbereichen und geringer Genauigkeit der Näherungsposition werden bei über der Hälfte der Auswertungen sehr gute Positionsgenauigkeiten erreicht, die, wie erwartet, von der DGM-Qualität sowie der Anzahl und Eigenschaft der LRF-Zielpunkte abhängen.
- In 7 von 10 Fällen weist die beste, der nur auf einzelnen Rasterpunkten basierenden Lösungen eine Lage- (dL) und Höhengenuigkeit (dH) von < 1 m auf. Nimmt man die Flecken-Lösung ohne Berücksichtigung einer nutzerbasierten Bewertung hinzu, dann verschlechtert sich die Bilanz auf 50 % der Auswertungen. Im Fall einer Auswertung mit Nutzeranalyse wird wiederum das Ergebnis der Einzelpunktlösung erreicht. Dies unterstreicht erneut die geringe numerische Zuverlässigkeit des Verfahrens sowie die Notwendigkeit einer kritischen Ergebnisprüfung durch den Anwender.
- Die Rechenzeiten für einen Suchbereich größer 50 m sind für den wirtschaftlichen Einsatz zu hoch, stellen aber auch nur eine Momentaufnahme mit der verwendeten Rechneinheit dar (s. Tab. 6-25). Hier sind Verbesserungen durch den Einsatz neuester Computertechnologie sowie durch Optimierungen im Algorithmus oder Nutzung einer performanteren Softwareumgebung möglich.
- Empfohlenes Vorgehen bei mehreren Flecken:
 1. möglichst wenig Werte in „besten“ Intervallklasse (< 10)
 2. Flecken mit kleinsten dH-Mittel auf Anzahl Rasterpunkte, Form und Lage im DGM prüfen
 3. Vergleich Flecken-Lösung mit Ergebnissen aus Einzelpunktberechnung
- der dH_m -Grenzwert bei der Fleckenlösung liegt meistens bei $\leq 0,3$ m, so dass grundsätzlich nur skalierte Ergebnisplots für $dH_m < 1$ m sinnvoll sind. Die nachfolgenden Abbildungen 6-58 und 6-59 zeigen hierzu jeweils ein Beispiel für eine gute (MISCH2) und eine schlechte (SCHEU3) Großraum-Lösung. Letzteres verdeutlicht nochmal die Bedeutung einer guten Näherungsposition (< 10 m) und der Möglichkeit der Suchraumverkleinerung, wodurch viele Lösungsmöglichkeiten wegfallen.

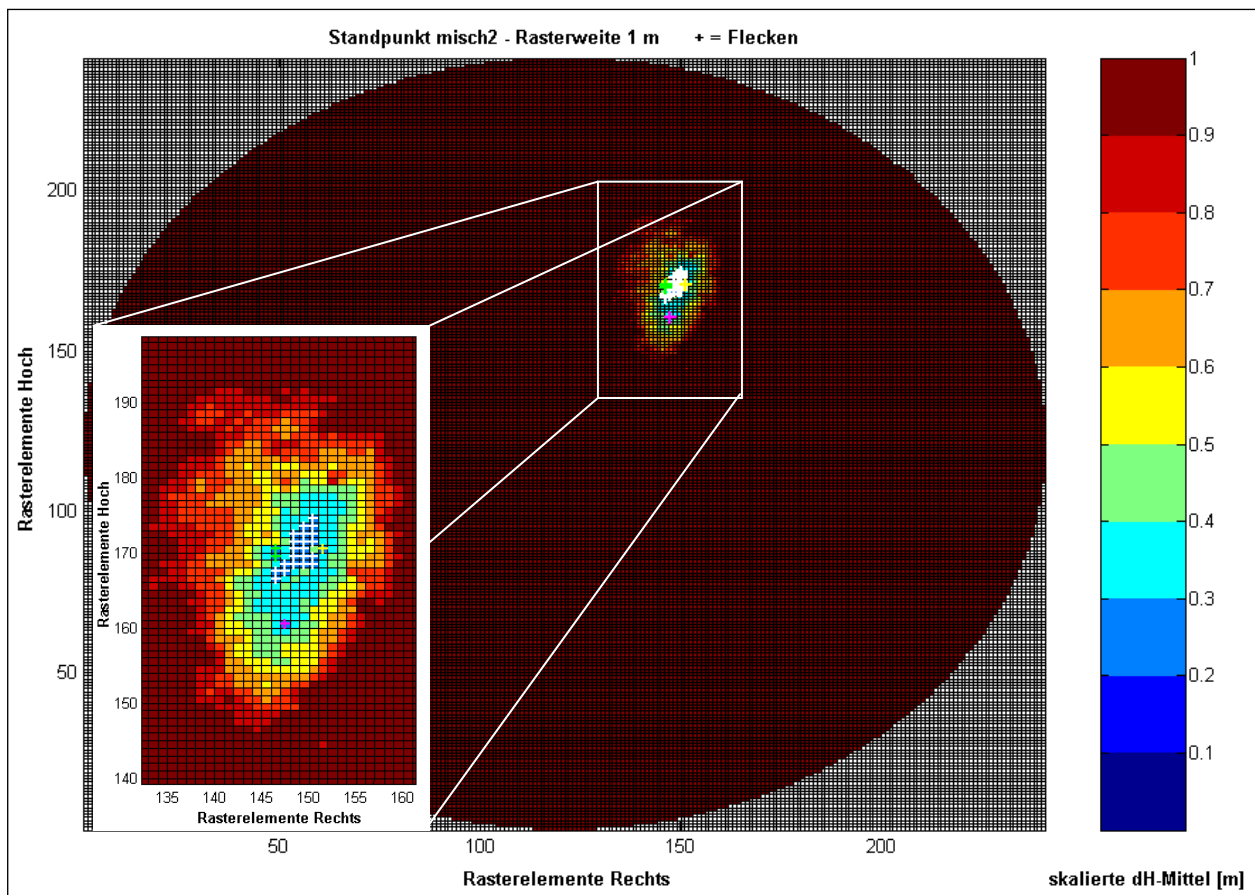


Abbildung 6-58: Ergebnis Flecken-Lösung der Großraum-Auswertung Testpunkt MISCH2 (Rasterplot)

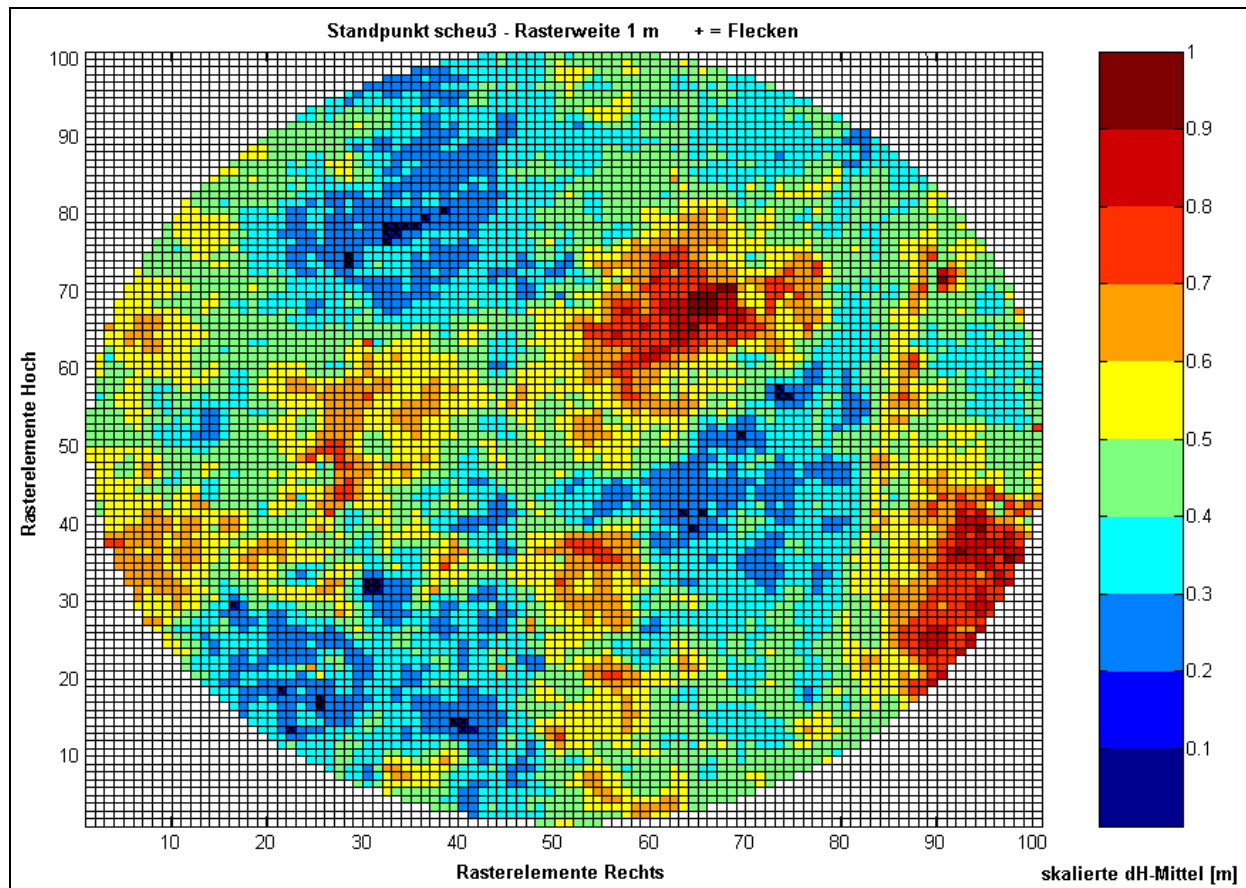


Abbildung 6-59: Ergebnis Flecken-Lösung der Großraum-Auswertung Testpunkt SCHEU3 (Rasterplot)

6.4.5.3. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick DGMMatch

Alle in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Beispiele haben sowohl das Potential als auch die noch vorhandenen Schwachpunkte dieser neuen, innovativen Positionierungsmethode für 3D-Polarsensoren aufgezeigt. Das Kernproblem ist die bereits mehrfach angesprochene geringe Signifikanz der numerischen Ergebnisse, da deren Unterschiede so groß oder sogar kleiner sind, wie die Unsicherheiten im DGM oder in den Messwerten des 3D-Polarsensors selbst. Deshalb ergeben sich aus den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen die folgenden Schlussfolgerungen:

- ☞ Das DGMMatch-Verfahren bietet auf der Basis hochaufgelöster digitaler Geländemodelle die Möglichkeit einer 3D-Positionierung ohne die Kenntnis von vor Ort vermarkten Referenzpunkten. Bei sehr guten Bedingungen (markanten Geländeformen, korrektem DGM und ausreichend genauen Beobachtungen) können Lagegenauigkeit von <1 m und unter normalen Bedingungen von wenigen Metern zuverlässig erreicht werden. Die Höhengenaugkeit von $\pm 0,5$ m ist für viel (forstliche) Applikationen mehr als ausreichend und konnte bei einer Genauigkeit der DGM-Höhen sowie der aus Beobachtungen eines 3D-Polarsensors abgeleiteten Höhenunterschiede von $\pm 0,2$ m erwartet werden.
- ☞ Die Auswertungstrategie stellt derzeit eine vom Nutzer abhängige Kombination und Interpretation alphanumerischer und grafischer Ergebnisse dar, die ein gewisses Maß an Erfahrung und in vielen Fällen ein iteratives Vorgehen voraussetzt. Deshalb, und auf Grund fehlender, eindeutiger Kriterien, ist z. Zt. auch kein voll automatisiertes Verfahren möglich.
- ☞ Die besten Ergebnisse werden mit einer möglichst hohen Anzahl an Zielpunkten erreicht. So sind auf Basis der bisherigen Auswertungen 10 -20 Messpunkte in weniger strukturiertem Gelände und 5-10 Zielpunkte bei markanten Geländeformen zu empfehlen.
- ☞ Der Einfluss von Gewichten für die dH_m ist gering (wenige dm) und nur bei großen Flecken sinnvoll. Diese sind hinsichtlich einer hohen Lagegenauigkeit aber relativ unsicher und zu vermeiden.

- ☞ Statistische Parameter, wie z. B. die Standardabweichung aller dH_m eines Fleckes, sind i. d. R. nicht aussagekräftig, da eine möglichst eindeutige Lösung nur aus wenigen Rasterpunkten besteht ($\sigma \sim 0$).
- ☞ Eine evtl. vorhandene Differenz zwischen dem realen Standpunkt der Messung innerhalb einer Rasterzelle und der nur auf Rasterpunkten durchgeführten DGM-Match-Auswertung ($< 0,75$ m Lagefehler) kann bei den vorliegenden Genauigkeiten des DGMs und der Messungen vernachlässigt werden.

Trotz der grundsätzlich positiven Ergebnisse bleibt festzuhalten, dass ein signifikantes Kriterium für die Bewertung der Ergebnisse ohne Kenntniss der tatsächlichen Lage- und Höhenabweichung noch fehlt. Die bisherigen alphanumerischen Ergebnisse und grafische Entscheidungshilfen reichen für ein hohes Maß an Zuverlässigkeit bei den hohen Genauigkeitsanforderungen von < 1 m nicht aus. Um dennoch das vorhandene Potential des Verfahrens in Zukunft nutzen zu können, sind weiterführende Arbeiten notwendig und lohnenswert. Folgende Möglichkeiten bzw. Ansatzpunkte werden in diesem Zusammenhang gesehen:

- Integration der Fleckelösung in das AutoDGMMatch-Verfahren.
- Kombination von Multi- und AutoDGMMatch.
- Auswertungen in anderen Testgebieten (z. B. Alpen), um mehr Erfahrungswerte zu sammeln und um das Potential des Verfahrens in alpiner Geländeumgebung zu analysieren. Die hierfür notwendigen digitalen Geländemodelle stehen bereits in Teilen Bayerns, einigen Bundesländern Österreichs oder Kantonen der Schweiz zumindest mit einer Rasterweite von bis zu 2 m zur Verfügung.
- Durchführung einer repräsentativen Auswertungsstudie, d.h. Berechnung möglichst vieler Testpunkte mit den exakt selben Parametern und ohne Kenntnis der Sollpositionen durch den Operator.
- Minderung des wichtigen Einflussfaktors *DGM-Qualität* (s. Kap. 6.4.3):

Auf Grund der Unsicherheiten im digitalen Geländemodell macht es Sinn, das DGM bereits bei der Messung im Feld vorzuhalten und die Berechnung in-situ durchzuführen. Damit ließe sich die Zuverlässigkeit einer DGMMatch-Positionierung durch eine Auswahl der markantesten Stellen vorab bzw. die Überprüfung der DGM-Qualität sowie die der Messpunkte durch visuelle Kontrolle direkt vor Ort erhöhen. Das Konzept für einen semi-automatischen Ablauf unter Matlab, bei dem eine LRF-Batchdatei direkt im Feld erzeugt und eine DGMMatch-Berechnung oder auch nur eine Visualisierung des DGM-Ausschnittes mit den Messpunkten gestartet werden kann, wurde bereits im Rahmen dieser Arbeit entworfen und ein Modul für die LRF-Messungen in Echtzeit prototypisch realisiert (s. Abb. 6-60). Ein umfangreicher Praxistest mit einer geeigneten mobilen Rechneinheit (u. a. großes Display) steht noch aus.

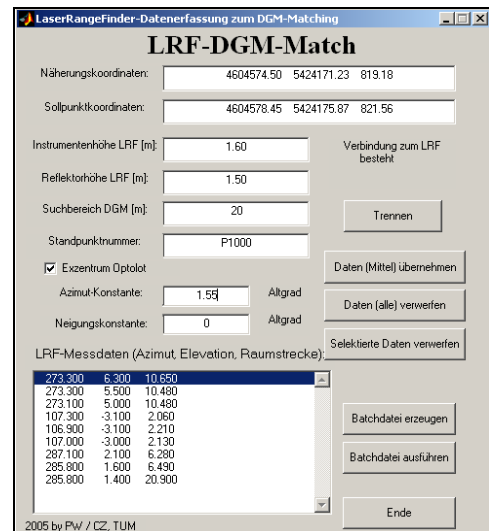


Abbildung 6-60: GUI von LRF-DGMMatch

Eine weitere Möglichkeit den Einfluss der DGM-Qualität auf die Positionierung mit dem DGM-Match-Verfahren zu verringern, besteht in der Nutzung von DGMs mit noch höherer Auflösung und Objektgenauigkeit. Die permanente Weiterentwicklung der LIDAR-Technologie erlaubt heute bereits die Erzeugung von digitalen Geländemodellen mit einer Auflösung von bis zu 0,1 m, einer Punktdichte von 10-40 Punkten / m^2 und einer absoluten Genauigkeit von < 20 cm [TOPOSYS 2005]. Auch wenn unter den schwierigen Bedingungen von waldreichen sowie alpinen Gebieten dieses Niveau nicht erreichbar sein wird und auf Grund der hohen Kosten nicht mit einer großflächigen Verfügbarkeit von Geländemodellen dieser Qualität in nächster Zukunft zu rechnen ist, wäre eine beispielhafte Analyse der Positionierungsmöglichkeiten mit DGMMatch auf Basis von besseren als den hier verwendeten Modellen sinnvoll und zielführend.

7. Beispielapplikationen aus der forstlichen Praxis

Im Folgenden werden einige Beispiele zur Erfassung und Fortführung von waldökologischen Objekten gegeben, die im Rahmen dieser Arbeit und während der Laufzeit des HTO-Projektes 33-2 näher untersucht oder realisiert wurden. Die softwaretechnische Umsetzung der in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Ansätze für die optimierte Auswertung von NMEA-Positionsergebnissen und die innovative Ortungsmethode mit DGM-Daten auf der mobilen Recheneinheit von SmobGIS war in dieser Zeit leider nicht möglich, da die hierfür eingeplante Anschlussfinanzierung auf Grund der Sparbeschlüsse der Bayerischen Landesregierung nicht genehmigt wurde. Trotzdem ist das Projekt als Erfolg zu bewerten, denn es liefert aus Sicht des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten „eine Vielzahl von Befunden, die sowohl aus wissenschaftlicher wie aus praktischer Sicht interessant und für den Nationalpark Bayerischer Wald unmittelbar nutzbar sind. Beispielhaft genannt sei hier die Möglichkeit der leichteren Auffindbarkeit von Inventurpunkten durch den Einsatz von GPS. Insgesamt wird das Projekt aus der Sicht des Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten daher als sehr gut bewertet“ [StMLF 2004].

7.1. Dauerbeobachtungsflächen

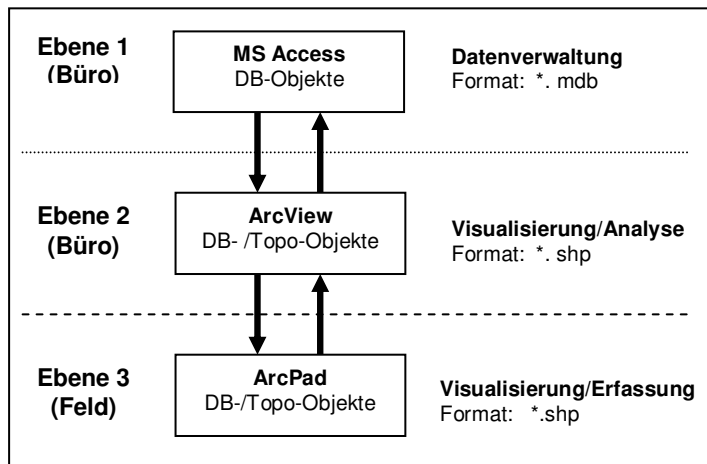


Abbildung 7-1: Datenfluss "Dauerbeobachtungsflächen"

Für den im Rahmen der Applikation „Dauerbeobachtungsflächen“ zu realisierenden digitalen Datenfluss (s. Kap. 4.5.1) stellte zunächst die GIS-konforme Visualisierung der bisher ausschließlich in einer MS Access-Datenbank verwalteten Objekte eine Grundvoraussetzung dar. D.h. neben einer grafischen Visualisierung (z. B. Nummer, Symbol) mußten auch die Objektattribute (z. B. Baumart, Aufnahmejahr) in einem geeigneten Datenformat zur Verfügung stehen. Erst dann konnten sie sowohl für Analysen im Desktop-GIS ArcView als auch für Auskunft- und Erfassungsaufgaben im mobilen GIS ArcPad verwendet werden.

Das hier realisierte Konzept unterscheidet zwischen *Datenbank-Objekten (DB-Objekte)* und *Topographischen Objekten (Topo-Objekte)*. Grund hierfür ist das in der Dauerbeobachtungsflächen-Datenbank der NPV (DBFI-DB) bisher verwendete Datenmodell. Darin basiert ein eindeutiger Datensatz auf einer einmalig vorhandenen Objektgeometrie, die durch max. zwei 3D-Punkte definierbar ist. Einem solchen Objekt können unterschiedlichste epochale Attribute zugeordnet werden (z. B. unterschiedliche Brusthöhen-durchmesser für die Aufnahmejahre 1995 und 2001). Bei den DB-Objekten handelt es sich somit um vollständig in der Datenbank modellierbare Objekte (Geometrie + Sachdaten). Bestehen die Objekte aus mehr als zwei Punkten, dann ist keine vollständige Abbildung in der Datenbank möglich. Da dies bei den meisten Topo-Objekten der Fall ist (z. B. Strassen, Wege), werden diese nur mit ein paar wenigen Sachdaten in der Datenbank geführt. Die Geometrie der Topo-Objekte wird hingegen ausschließlich im zentralen/mobilen GIS verwaltet. Einzige Ausnahme sind die Probequadrate von Versuchsflächen und die sog. Kronenprojektionen. Für diese Objekte wurden eigene Tabellen angelegt, so dass auch ihre gesamte Geometrie in der DBFI-DB verwaltet werden kann. Die Abb. 7-2 zeigt das im Projekt optimierte Datenmodell.

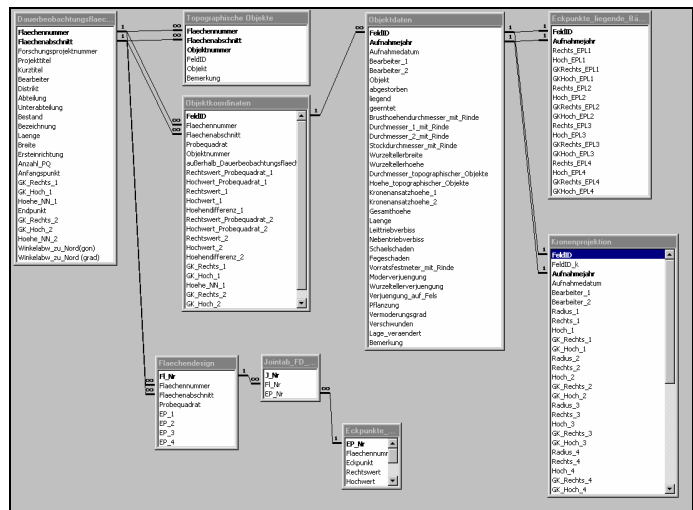


Abbildung 7-2: Datenmodell DBFI-DB

Neben den waldökologischen Objektdaten waren für eine praxistaugliche Objekterfassung und –visualisierung mit SmobGIS im Feld noch weitere Funktionen notwendig, die nicht standardmäßig von ArcPad angeboten und daher zusätzlich realisiert wurden. Hierzu zählen:

- online Anschluss Tachymeter TCR307 (Leica Geosystems) inklusive der Messverfahren *Standpunktorientierung mit Fernziel, freie Stationierung, polare Punkteinmessung, Absteckung* zur Erfassung und direkten Visualisierung von Punkt-, Linien und Flächenobjekte. Beispiele für die softwaretechnische Realisierung werden in Kap. 6.3 gegeben.
- formularbasierte Sachdateneingabe mit DBFI-spezifischer Plausibilitätsprüfung (s. Abb. 7-4)
- benutzerfreundliche Eingabe, z.B. durch automatische Kontrolle der Objektnummer oder Definition von Vorgabewerten für bestimmte Datenfelder
- digitale Notiz-Funktion direkt in der Grafik und automatische Markierung bearbeiteter Objekte

Nach der Objektaufnahme mit SmobGIS können die aufdatierten Shape-Files verlustfrei in ArcView importiert und die DBFI-Datenbank über die aufdatierten Attributtabelle und eine vordefinierte Aktualisierungsabfrage einfach aktualisiert werden, so dass sie für weitere Analysen im Büro zur Verfügung stehen.



Abbildung 7-5: DBFI-Feldmessung mit SmobGIS

Der hier aufgezeigte Workflow für die Fortführung von allen relevanten Punkt-, Linien- und Polygonobjekten einer Dauerbeobachtungsfläche inkl. ihrer Attribute wurde exemplarisch anhand der Dauerbeobachtungsfläche „Schönort“ im Nationalpark Bayerischer Wald realisiert (s. Abb. 7-5), getestet und die zuständigen Mitarbeiter der Nationalparkverwaltung im Rahmen des HTO-Projektes 33-2 geschult. Weitere ausführliche Informationen zu den Grundlagen und den einzelnen Arbeitsschritten für die Visualisierung in ArcView 3.2, den Import und Export der für die Feldaufnahmen in Dauerbeobachtungsflächen notwendigen Daten sowie den für ArcPad 6 realisierten Zusatzmodulen finden sich in [Czaja 2003d].

7.2. Topographische Objektaufnahme

Die Anforderungsanalyse in Kap. 4.5.2 hat ergeben, dass mit Hilfe der SmobGIS-Technologie eine, einfache, schnelle, positionsbezogene und vor allem digitale Erfassung und Fortführung von topographischen Objekten im weitläufigen Nationalparkgebiet möglich sein soll. Die Art der Umsetzung hatte sich hierbei im Wesentlichen an den Anforderungen hinsichtlich der Positionierung und einer gleichzeitigen Visualisierung digitaler Geodaten zu orientieren. So kommen für die Positionierung folgende Möglichkeiten bei der Bearbeitung von topographischen Objekten im Nationalpark Bayerischer Wald in Betracht:

1. Verifizierung der (ungefähren) Position über ein Luftbild durch den Bearbeiter vor Ort.
2. GPS-Handheld für absolute Positionierung (5-10 m) mit anschließender umgebungsabhängiger Korrektur durch den Bearbeiter anhand einer vorliegenden Karte (z.B. richtige Strassenseite).
3. Einsatz DGPS-Rucksacksysteme GS50 bei höheren Genauigkeitsanforderungen (1 – 5 m).
4. Polare Einmessung der Objekte bei nicht GPS-tauglicher Umgebung (z. B. auf Grund zu starker Abschattungen) mittels 3D-Polarsensor von einem bekannten Standpunkt aus.

Bis auf das DGPS-Rucksacksystem erfordern alle anderen Positionierungsmethoden die Verfügbarkeit von digitalen Geodaten und/oder einer Applikationssoftware mit geeigneter Funktionalität auf einer mobilen Recheneinheit. So ist beispielsweise eine einfache und effiziente Aufnahme von Wanderwegen direkt im GK-Koordinatensystem auch nur mit dem DGPS-Rucksacksystem möglich (s. Abb. 7-6). Hierfür wurde im GS50 ein Liniencode „Wanderweg“ definiert, der eine automatische Aufzeichnung von sog. *Eckpunkten* mit einer Messrate von max. 1 Hz erlaubt. Die aufgezeichneten Punkte können anschließend über die bei der NPV vorhandenen Softwarepakete *GISDataPro* oder *SKI Pro* (beide Leica Geosystems) ausgelesen, überprüft und konvertiert sowie in ArcView importiert und attributabhängig visualisiert werden (z. B. Koordinatenqualität). Bei ausreichender Datenqualität erfolgt die Übernahme in das zentrale GIS.



Abbildung 7-6: DGPS-Aufnahme Wanderweg

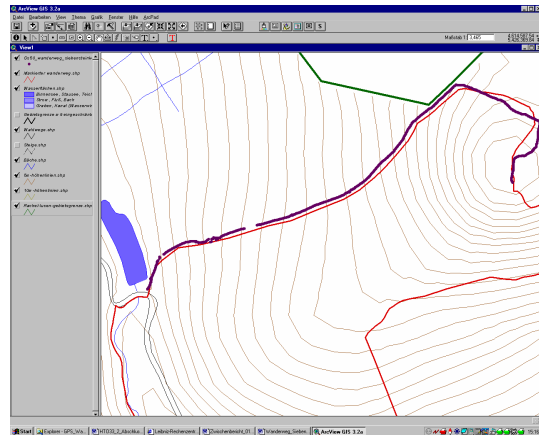


Abbildung 7-7: Visualisierung Wanderweg ArcView

Für die grafisch orientierte Erfassung topographischer Objekte wurde als Applikationssoftware wiederum ein anwendungsspezifisch angepasstes ArcPad 6 eingesetzt, als zentrales Informationssystem diente das Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“. Die Realisierung erfolgte in erster Linie für den Einsatz auf einem preisgünstigen Pocket-PC iPaq H3630 von Compaq als mobile Recheneinheit. Da das Gerät hinsichtlich Rechenleistung, Speicherplatz und vor allem Displaygröße Einschränkungen aufweist, müssen sowohl bei der Auswahl der Datenmenge bzw. des Datenformates als auch bei der Erzeugung von Formularen für eine Sachdateneingabe gewisse Aspekte berücksichtigt werden. Dies sind u. a.

- ☞ Verwendung von Rasterdaten im Format *MrSid*, das von ArcPad unterstützt wird und die Datenmenge durch Komprimierung erheblich reduziert. Dabei hat sich für Luftbilder in s/w ein Komprimierungsfaktor von 10% und für farbige Bilder von 20 % als sinnvoll erwiesen. Vektordaten sollten für einen zügigen Bildaufbau max. für das Nationalparkgebiet vorgehalten werden.
- ☞ Formulare sollten nicht größer als 130 x 130 Pixel groß sein. Dadurch sind Eingaben und Lesbarkeit von umfangreichen (Text-) Information nur eingeschränkt möglich.

In dem hier erfolgreich umgesetzten und getesteten Beispiel wurde die amtliche, digitale Topographische Karte 1:25000 im *MrSid*-Format (10% Komprimierung) als Hintergrundkarte verwendet. Dieses Kartenwerk ist für Orientierungszwecke völlig ausreichend und erfordert im Gegensatz zu den in mehreren Shape-Layern vorgehaltenen Vektordaten (z. B. Strassen, Höhenlinien etc.) auch nur ein einfaches Datenmanagement. Für die Erfassung und Visualisierung der im Workflow definierten topographischen Objekte *Weg*, *Infoträger*, *Parkplatz* und *Gebäude* wurden unter ArcPad 6 u.a. folgende Funktionen genutzt:

- Objekterfassung mit GPS (NMEA-Daten) oder 3D-Polarsensor (LRF-Modul; s. Kap. 6.3.1)
- digitaler Notiz-Funktion direkt in der Grafik (s. Abb. 7-8 (links))
- formularbasierte Auskunft und Eingabe *TopoNPV* (s. Abb. 7-8 (mitte))
- Zuordnung von digitalen Bildern (s. Abb. 7-8 (rechts))



Abbildung 7-8: ArcPad-Beispielfunktionen der Applikation *TopoNPV*

7.3. Waldinventur mit sensorgestütztem mobilen GIS

7.3.1. Waldinventur Nationalpark Bayerischer Wald

Das im Nationalpark angewendete Inventurverfahren wurde im Rahmen des Projektes auf Basis der durchgeführten Anforderungsanalyse sowie den praktischen Erfahrungen und den fachlichen Grundlagen der Waldinventur 2002 für SmobGIS prototypisch umgesetzt. Hierbei kam das echtzeitfähige DGPS-Rucksacksystem GS50 sowie der Gürtel-PC ViA II (oder Laptop) mit der Applikationssoftware ArcPad 6 zum Einsatz, wobei eine Anpassung auf die Eigenschaften einer kleineren, mobilen Recheneinheit jederzeit möglich ist. Wie in Kap. 4.5.3 ausgeführt, setzen sich die für eine Visualisierung notwendigen Daten aus den *Steuerparametern*, den *Objektdaten* und der *Hintergrundgrafik* zusammen. Bis auf die Steuerparameter stammen alle für das hier dargestellte Beispiel verwendete Informationen vom Geodatenserver über den in Kap. 4.4 beschriebenen filebasierten Datenaustausch. Die Steuerparameter werden in den dBase-Dateien abgelegt, auf die mittels Programmcode von den Eingabefeldern oder den Plausibilitätsprüfungen aus zugegriffen wird. Allerdings war eine vollständige Parameterübernahme nicht möglich, da die sog. Vorverarbeitung der Inventurdaten, bei der beispielsweise der BHD der letzten Inventur auf die aktuelle Jahreszahl hochgerechnet wird oder die Bäume anhand ihrer laufenden Nummer „eingereiht“ werden, nur in Verbindung mit den aktuellen Inventurdaten der FE-DB möglich ist.

Grundsätzlich ist eine gebietsweise Strukturierung der Daten sinnvoll, um die Datenmengen überschaubar zu halten. In diesem Fall boten sich die vorgegebenen Inventurklassen an, die noch zusätzlich nach Inventurtrupp und Gebiet pro Arbeitswoche unterteilt werden sollten. Folgende Informationen wurden verwendet und stehen im mobilen GIS zur Verfügung:

Objektdaten (Vektordaten):

- topographische Objekte (Höhenlinien Strassen, Waldwege, Steige, Bebauung, ...). Sie können ganz individuell je nach Wunsch und Notwendigkeit zusammengestellt werden.
- Inventurpunkte, wobei ihre Koordinaten aus dem zentralen Objekt *Inventurkreis* stammen und zusätzlich auch dessen Attribute sowie die der Nicht-Koordinatenbäume angefügt sind.
- Koordinatenbäume
- Inventurkreise als grafisches Polygonobjekt für Orientierungszwecke

Hintergrundgrafik (Rasterdaten):

- Luftbild im Format MrSid (10% – 20% Komprimierung)
- Dynamische Waldkarte als sog. GeoJPG (aus ArcView mit den ArcPad Tools generierbar)

Steuerparameter (exemplarisch):

- Steuerpara_Invklasse_1
- Probekreisgrößen, Bauartengruppen, Schadensumfänge, Werteklassen

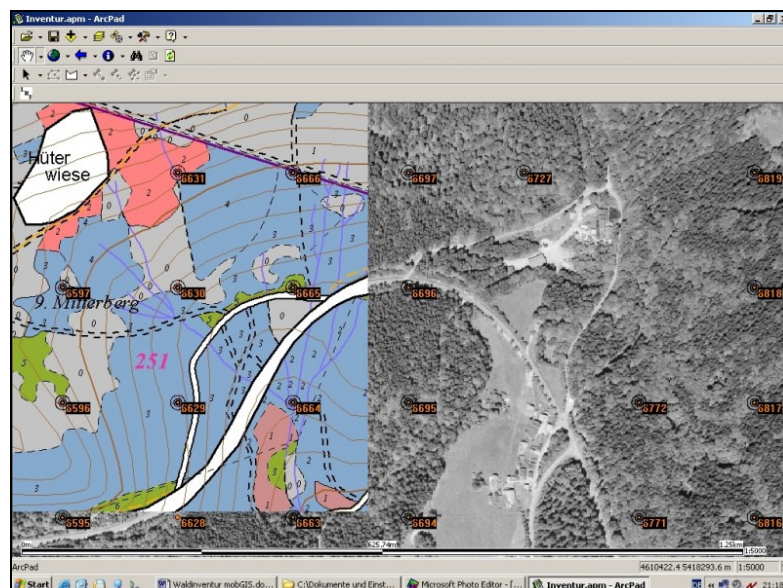


Abbildung 7-9: Objektdaten und Hintergrundgrafik SmobGIS-Applikation „Inventur“

Die Abbildung 7-9 gibt einen Überblick über die für die grafische Visualisierung verwendeten Daten. Dabei wurde absichtlich sowohl das Luftbild als auch die dynamische Waldkarte mit den Entwicklungsstadien dargestellt, denn je nach Bearbeiter oder Umgebungssituation wird die eine oder die andere Informationsquelle besser geeignet sein. Nähert man sich dem Inventurpunkt an, dann werden die Hintergrundgrafiken respektive Rasterdaten automatisch ausgeblendet und die Inventurkreise sowie Koordinatenbäume eingeblendet, so dass ein Baumplot zur Verfügung steht, der in einer erster Näherung dem heute verwendeten analogen Plot entspricht (s. Abb. 7-10). Selektiert man den Inventurpunkt oder einen Koordinatenbaum, dann werden die aktuellen Attributinformationen in einem Formular angezeigt und können bearbeitet werden. In Verbindung mit der Anzeige der aktuellen GPS-Position steht somit ein sensorgestütztes GIS für die Nutzung der in Kap. 1.2 beschriebenen Vorteile einer direkten vor-Ort-Verarbeitung von raumbezogenen Inventurdaten zur Verfügung.

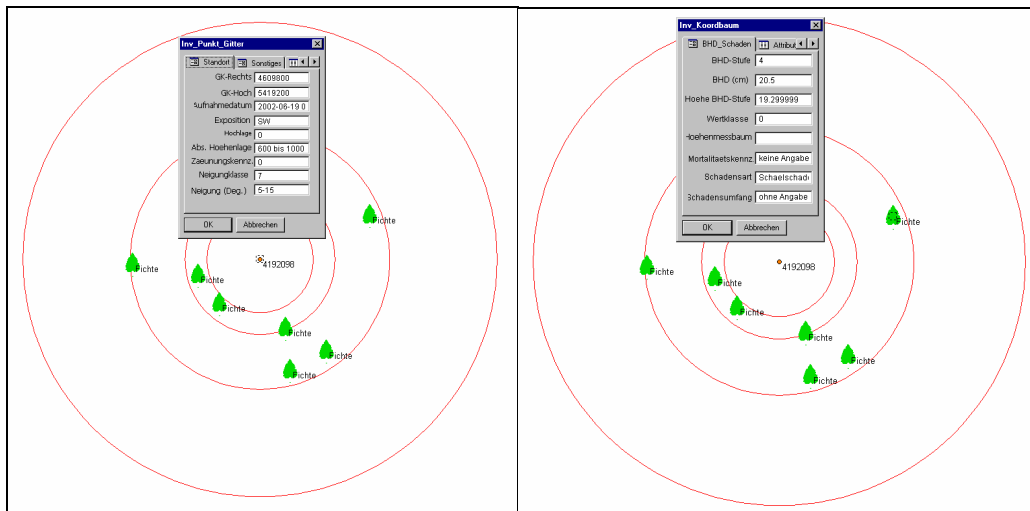


Abbildung 7-10: Beispiel für Baumplot SmobGIS-Applikation "Inventur"

7.3.2. Bundeswaldinventur II

Bei der regelmäßig durchzuführenden Bundeswaldinventur (BWI) handelt es sich um eine permanente Forstinventur. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, ist es zwingend notwendig, dass die Aufnahmetrupps die gleichen, im bundeseinheitlichen Rasterabstand von 4 km angelegten Trakte (= vier im Quadrat angeordnete Stichprobenpunkte, s. Abb. 7-11) der vorhergehenden BWI verwenden. Das Auffinden und Einmessen der 6589 Stichprobenpunkte und 2520 Einhängenpunkte in Bayern erforderte bisher immer einen erheblichen Zeitaufwand und ergab stellenweise absolute Lageabweichungen von bis zu 50 m [HAMBERGER, MÖBMER 2002], so dass in einer Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für forstliche Arbeitswissenschaft und angewandte Informatik der TU München sowohl das Navigationspotential von GPS in Verbindung mit einer geeigneten Software als auch die Möglichkeiten der präzisen Punktbestimmung untersucht (s. Kap. 5.2) und hierfür eine kostengünstige SmobGIS-Lösung realisiert wurde.

☛ Problembeschreibung

Das Aufnahmeverfahren sieht vor, daß ausgehend vom Einhängenpunkt E über Einmessung mit polaren Koordinaten die Traktecken rekonstruiert werden. Neben der vorgegebenen Lage-Geometrie des Traktes hilft der bei der BWI I erfaßte Baumplot (=Lage der Bäume im Verhältnis zum Mittelpunkt). Ist die Lage der Traktecke bis auf wenige Quadratmeter sicher, wird mit einem Metalldetektor die Metallmarke gesucht, die eine Traktecke markiert. Das Verfahren des Einmessens mit konventionellem Gerät ist sehr zeitaufwendig, da eine präzise Einmessung über eine längere Strecke erforderlich ist. Es ist darüber hinaus körperlich anstrengend, im Gebirge evtl. gefährlich, da die direkten

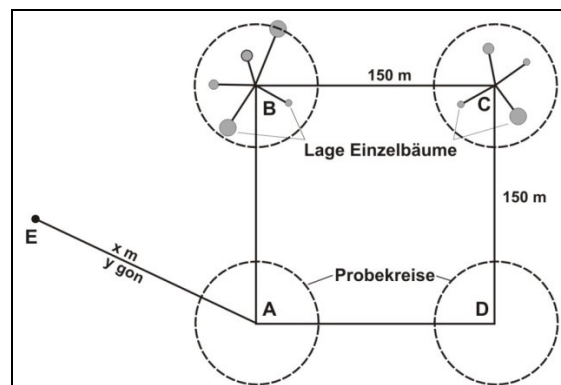


Abbildung 7-11: Trakt Bundeswaldinventur

Distanzen zwischen den Punkten gemessen werden müssen (unwegsames Gelände, dichte Bestände, steile Passagen). Auch ist es in der Praxis oft nicht möglich, Punkte, die vor 10-15 Jahren angelegt und markiert wurden, wieder zu finden. So ist die Punktmarkierung zwar noch vorhanden, kann aber auf Grund der völlig veränderten Bestandessituation nicht mit Hilfe eines Baumplots aus der BWI I rekonstruiert werden. Oder die Einmeßskizze zum Einhängepunkt kann durch bauliche oder Geländeänderungen nutzlos geworden sein (z. B. zerstörte Grenzsteine). In diesem Fall, ist es mit konventionellen Möglichkeiten nahezu ausgeschlossen, den Punkt wieder zu finden. Zumal von E auch keine Lagekoordinaten in einem übergeordneten Koordinatensystem vorliegen. Lediglich die aus der Flurkarte abgegriffenen Gauß-Krüger Koordinaten der Traktecke A wurden in der BWI-Datenbank eingetragen, was in Kombination mit den geringen Genauigkeiten konventioneller Messmittel zu teilweise hohen Abweichungen in der absoluten Lage und Schwierigkeiten bei der Verknüpfung mit anderen Informationsschichten (z.B. Luftbild) führt.

☞ Lösungsansatz

Durch die von A aus definierten Polarkoordinaten von E und die quadratische Lagebeziehung der Traktecken ABCD ist eine Geometrie vorgegeben, die in sich steif ist. Mit Hilfe des im GK-System bekannten Traktpunktes A und den Polarkoordinaten von E können GK-Grobkoordinaten für E berechnet werden, die sich über geeignete Transformationsparameter mit den GPS-Koordinaten in Verbindung bringen lassen. Anschließend erfolgt die Navigation zu E auf Basis der Grobkoordinaten mit GPS. Für das Auffinden von E genügen die Grobkoordinaten, da es sich um markante Punkte handelt und die Inventurtrupps den Lageplan von E aus der BWI I mit sich führen. Ist der Einhängepunkt identifiziert, dann werden über eine statisch GPS-Punkteinmessung neue GK-Koordinaten für E bestimmt. Oft befindet sich E auf einer Fläche mit relativ freiem Himmel, wodurch eine gute Satellitensichtbarkeit gegeben ist und Lagegenauigkeit < 5m erreichbar sind. Damit sind die bei E gemessenen Koordinaten präziser als die aus dem Kartenabgriff abgeleiteten Grobkoordinaten. Anschließend erfolgt über die festen geometrischen Beziehung des Traktes zu E eine Neuberechnung der GK-Koordinaten von ABCD. Sie weisen dabei den gleichen Lagefehler auf wie ihre Berechnungsbasis zuzüglich den Lagefehler, der bei der Anlage des Traktes entstanden ist. Beide zusammen sind erfahrungsgemäß geringer als 10m. Mit diesen berechneten Koordinaten liegen nun Werte eines übergeordneten Koordinatensystems vor mit denen mit hinreichender Genauigkeit in die Nähe des Traktpunktes navigiert werden kann. Für die punktgenaue Suche der Traktecke ist GPS nicht geeignet, da die erforderliche Genauigkeit von <1 m im Wald nicht gegeben ist [HAMBERGER, CZAJA, BOLLIN 2001]. Zusammen mit anderen Orientierungsmerkmalen, wie z. B. dem digitalen Baumplot, kann GPS dennoch erfolgreich als Navigationsmittel eingesetzt werden. Ist mit dem Plot die vermutete Lage der Traktecke rekonstruiert, muss mit dem Metalldetektor die endgültige Lage bestätigt werden.

☞ Softwarerealisierung

Das Programm *BWI-Nav* ist trotz der komplexen Berechnungen in seiner Oberfläche einfach gehalten. Der Bediener soll möglichst wenig eigene Entscheidungen treffen können und eng durch das Programm geführt werden, um Fehlbedienungen zu vermeiden. Das Programm ist auf dem bei der Inventur mitgeführten Pen-PC Husky FC-PX5 lauffähig, wodurch Anschaffungskosten gespart werden konnten. Die Positionsdaten erhält das Programm von einem kompakten L1-Code-DGPS-Empfänger über die serielle Schnittstelle im Datenformat NMEA-0183. Der Hauptbildschirm des Programms *BWI-Nav* geht aus Abbildung 7-12 hervor. Zunächst ist der zu bearbeitende Trakt anhand der Traktnummernliste und der Navigationspunkt auszuwählen. Wird der Navigationsvorgang gestartet, dann zeigt das Feld *GPS-Status* den Empfangsstatus an. Die aktuelle Antennenposition, wird als rotes Fadenkreuz angezeigt. Die Bewegungsrichtung erscheint als rote Spur, anhängend am Fadenkreuz. Mit zunehmender Annäherung der Antennenposition an den gesuchten Punkt zoomt sich das Programm automatisch in den Kartenausschnitt hinein. Zunächst wird ein 25m-Kreis angezeigt. Überschreitet man dessen Linie, wird zusätzlich ein 10 m-Kreis angezeigt. In aller Regel ist dieser markante Punkt bereits zu sehen, wenn man den 10 m-Kreis betritt.

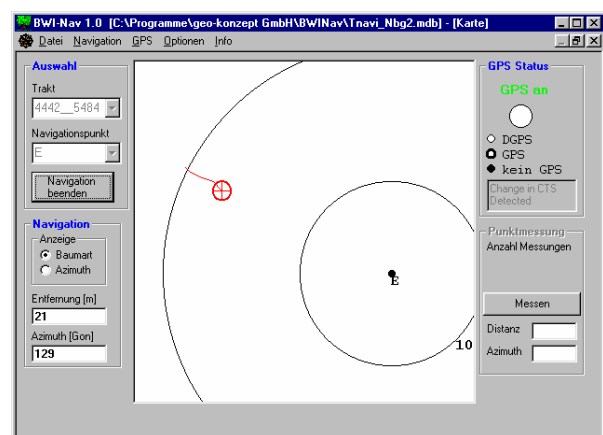


Abbildung 7-12: *BWI-Nav* Hauptbildschirm Navigation

Beim Meßvorgang werden die Positionen über den gewählten Meßzeitraum erfaßt und gemittelt. Als Qualitätsinformation wird u.a. die Standardabweichung angegeben. Ist sie sehr hoch, kann sich der Nutzer für eine zweite Messung entscheiden. Übernommen wird dann der bessere Wert. Wenn E an einem Punkt liegt, der hinsichtlich der Einmessung mit GPS schwierig ist, beispielweise weil E stark überschirmt ist oder in einer Schlucht liegt, kann eine exzentrische Messung an einem besser geeigneten Ort durchgeführt werden. Diese günstigere Position wird mit Kompaß und Entfernungsmesser in ihrer Lage zu E bestimmt.

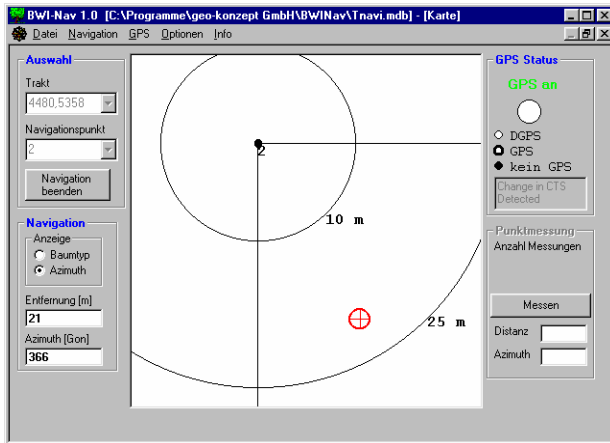


Abbildung 7-13: Navigation zur Traktecke B (=2)

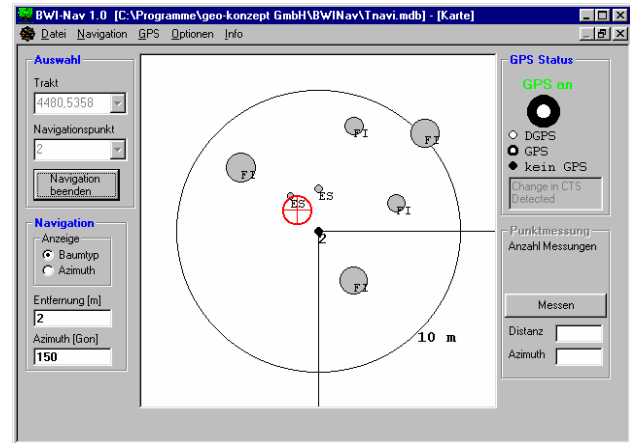


Abbildung 7-14: Darstellung Baumplot

Bei der Navigation zur Bezugstraktecke werden als Grob-Orientierung die Traktlinien, der 25 m-Kreis und der 10 m-Kreis angezeigt (s. Abb. 7-13). Als Feinorientierung sind unten links die aktuelle Distanz und der aktuelle Winkel zu sehen. Wird der 10 m-Kreis betreten, kommt als zusätzliches Hilfsmittel der Orientierung der Baumplot hinzu, der die Bäume entsprechend ihrer Lage zur Traktecke angezeigt (s. Abb. 7-14). Ein Baum wird entsprechend seinem BHD als Kreis mit variabler Größe und in der Standard-einstellung mit seiner Baumart dargestellt. Der Navigator muß nun versuchen seine eigene Position mit der Traktecke in Übereinstimmung zu bekommen. Ist dies geschehen bzw. eine Position nahe der Traktecke erreicht, dann muss der Nutzer versuchen, einen oder mehrere Bäume aus dem angezeigten Baumplot zu identifizieren. Dabei kann er im Programm alternativ zur Anzeige der Baumart auch den Azimut und die Distanz darstellen. Die Identifizierung einzelner Bäume wird umso leichter gelingen, je differenzierter der Baumplot ist. Ist einer oder sind mehrere der Bäume erkannt worden, beginnt die Feinnavigation. Die Traktecke kann nun aus den polaren Koordinaten bestimmt werden. Ist die Lage bis auf wenige m² genau rekonstruiert, wird mit dem Metalldetektor die Metallmarke aufgespürt und die zu erhebenden Baumdaten in ein spezielles Programm zur Inventurdatenerfassung eingegeben.

☞ Bewertung

Im Rahmen der BWI in Bayern wurde die Aufnahme von ca. 1000 Einhängen und ca. 1100 Trakt-punkten mit dem hier beschriebenen System evaluiert. Demnach hat sich das ausgewählte, hochintegrierte DGPS/LW-System *DGPS-Box* der Fa. Wohlfeil grundsätzlich bewährt und beschwert nicht zu sehr die ohnehin schon sehr umfangreiche Ausrüstung der Inventurtruppe [MÖBMER et al. 2002]. Das Navigationsprogramm ist übersichtlich aufgebaut und bietet an die Nutzerbedürfnisse gut angepasste Berechnungs- und Orientierungshilfen. Besonders effektiv erleichterte das Navigationssystem das Aufsuchen des Einhängenpunktes, wodurch im Schnitt 10 Minuten eingespart werden können. Die Zeitersparnis hängt aber im Wesentlichen von der richtigen Abwägung des Trupps ab, inwieweit der Einsatz von GPS am jeweiligen Punkt zum Erfolg führt. Dabei ist zu berücksichtigen, ob ein ausreichend differenzierter Lageplot verfügbar ist (75 % der Punkte) und ob die Satellitenanzahl sowie die Gelände- und Bewuchssituation eine zuverlässige Punktbestimmung erwarten lässt. Insgesamt entschieden sich die Truppe in bis zu 50 % der Fälle für die GPS-Navigation, wobei sie in 80 % der Fälle vom System erfolgreich in den 10 m-Kreis geführt wurden. Abweichungen ergaben sich dabei nicht nur durch den fehlenden Satellitenempfang, sondern häufiger als erwartet durch Differenzen zwischen der Soll-Lage aus der Anlage der Punkte in der BWI I und der tatsächlichen Lage in der Natur. Auch die statische Punkteinmessung von E entsprach den Vorgaben und den in [CZAJA, HAMBERGER 2001] verifizierten Geräte-Genauigkeiten von ≤ 5 m, was für Fachkartierungen und die Integration in ein GIS ausreicht, so dass die Aufnahmetruppe der BWI auf die Unterstützung durch ein solches sensorgestütztes mobile GIS in Zukunft nicht mehr verzichten wollen.

7.4. GPS-gestützte Erfassung inventurbezogener Objektpunkte

Grundsätzlich werden mit dem Einsatz des GPS-Messverfahrens von der Nationalparkverwaltung die folgenden Ziele verfolgt [CZAJA, HEURICH 2003]:

1. Leichteres Auffinden der Inventurpunkte bei Folgeinventuren

In den großflächigen Naturwäldern des Nationalparks ist die Orientierung oft sehr schwierig. Da die vom Menschen geschaffene Waldeinteilung in Distrikte und Abteilungen nicht mehr unterhalten wird, kann sie auch nicht mehr für die Orientierung genutzt werden. Das gleiche gilt auch für Infrastruktureinrichtungen wie Forststraßen, die in den vergangenen Jahren gezielt zurückgebaut wurden. Dadurch gehen immer mehr Startpunkte für die Einmesszüge der Inventurpunkte verloren, bzw. können nicht oder nur mit sehr großem Aufwand gefunden werden. Durch die GPS-Einmessung soll ein Auffinden der Punkte möglich werden, ohne dass Fixpunkte im Gelände unterhalten werden müssen.

2. Schnellere Navigation zwischen den Inventurpunkten

Die Navigation zwischen den Inventurpunkten erfolgte bisher mit Kompass und Ultraschallentfernungsmesser. Aufgrund des großflächigen Buchdruckerbefalls im Nationalpark und den damit verbundenen Hindernissen durch Totholzverhaue wird eine Navigation mit Marschkompasszahl sehr erschwert. GPS-Empfänger sollen hier ein flexibles Auffinden von Inventurpunkten ohne Festhalten an starren Kompasszügen erlauben, so das sich die Wegezeit zwischen den Punkten reduzieren.

3. Verringerung der Unfallgefährdung

Durch die größere Flexibilität bei der Auswahl der Anmarschwege, können gefahrenträchtige Bereiche, wie Totholzverhaue und Hänger einfach umgangen und das Verletzungsrisiko verringert werden.

4. Bessere Zuordnung von Inventurpunkten zu thematischen Layern

Aufgrund ungenauer Kartengrundlagen bei der Einmessung der Inventurpunkte ist die Punktlage zum Teil nur mit einer Abweichung von über 20 m zu den Sollkoordinaten bekannt. Bei Verschneidungsoperationen mit thematischen Karten oder Fernerkundungsdaten innerhalb des Referenz-GIS oder Geodaten-servers ist daher mit einem entsprechenden Zuordnungsfehler zu rechnen. Durch eine genauere Bestimmung des Raumbezuges mit Hilfe von GPS soll dieser Fehler vermindert werden.

7.4.1. Inventurpunktgitter Nationalpark Bayerischer Wald

Die Inventurpunkte im Nationalpark Bayerischer Wald in einem regelmäßigen Raster mit einer Kantenlänge von 200m über die Nationalparkfläche verteilt (s. Kap. 4.5.3). Dies ergibt bei einer Holzbodenfläche von 24.500 ha 5859 Inventurpunkte. Um diese enorme Anzahl von Inventurpunkten zu erfassen, wurden bei der letzten Waldinventur im Sommerhalbjahr 2002 bis zu 15 Inventurtrupps eingesetzt. Angeregt durch die bis dato, positiven Projektergebnisse zum Thema GPS-Positionierung im Wald, wurde im Rahmen dieser Inventur auch der Einsatz von DGPS-Empfängern erprobt. Insgesamt konnten drei Inventurtrupps mit einem DGPS-System vom Typ Leica GS50 ausgestattet sowie ein in [CZAJA 2003a] ausführlich dokumentierter Verfahrensablauf erarbeitet werden.

☛ Messverfahren

Primäres Ziel des hier angewendeten Messverfahrens war eine ausreichend genaue und zuverlässige Positionierung der Inventurpunkte in Echtzeit, d.h. die Positionsbestimmung erfolgt unmittelbar im Feld und nicht durch eine zusätzliche Auswertung im Büro (z. B. bei lokaler, eigener Referenzstation notwendig). Das hier eingesetzte DGPS-System bestand aus dem L1-Code-Empfänger GS50 mit integrierter Geo-Datenbank (Punktverwaltung, Attributierung etc.), externer L1-Antenne, Bedienungsterminal sowie einem LW/UKW-Decoder mit entsprechenden Antennen für den Empfang von DGPS-Korrekturdaten der Echtzeitpositionierungsdienste ALF und RASANT von SAPOS. Als Alternative zu diesen radiogestützten DGPS-Verfahren wurde auch die Verwendung von (genaueren) Korrekturdaten über das GSM-Mobilfunknetz in Betracht gezogen, aber auf Grund der großen Lücken in der bestehenden Netzabdeckung im Nationalpark wieder verworfen. Alle Einzelkomponenten bis auf den zerlegten Lotstock waren in einem kleinen Rucksack untergebracht, was im Gegensatz zu einer reinen Lotstablösung die ergonomischere Variante beim Einsatz von DGPS-Systemen in einem teilweise sehr schwer zu begehenden Naturwald darstellt. Auf Grund der klimatischen Bedingungen im Bayerischen Wald musste die Einmessung in den für GPS ungünstigsten Monaten Mai – November (Abschattungen durch Bewuchs) stattfinden. Die GPS Messungen erfolgten parallel zu den Inventurarbeiten, so dass sich der Arbeitsaufwand am Inventur-



Abbildung 7-15: GPS-Messung Inventurpunkt Nationalpark Bayerischer Wald

punkt nur unwesentlich erhöhte. Damit sich die GPS- und Inventuraufnahme nicht gegenseitig behinderten, wurde der Lotstock mit der GPS-Antenne am nördlichen Rand der Rohrmarke und der Transponder für das Ultraschallmessgerät direkt zentrisch platziert. Die geringe Exzentrizität der GPS-Antenne von < 5 cm ist hierbei gegenüber der angestrebten Genauigkeit von 1-5 m vernachlässigbar. Für die eigentliche GPS-Messung sah das Verfahren je nach Beobachtungsbedingungen drei Varianten vor (s. Tabelle 7-1), die sich vor allem hinsichtlich der Einstellungen bzgl. des Signalempfangs und der Beobachtungsdauer unterschieden. Neben dem erfolgreichen Empfang von Korrekturdaten stellt dabei die im GS50 verwendete MaxTrak-Technologie [STANSEL, MAENPA 1999] mit den Einstellungen *MaxGenauigkeit/MaxEmpfang* ein wesentliches Bewertungskriterium dar, wodurch der Anwender die Güte der zu empfangenen GPS-Signale definieren kann. Zusätzlich waren alle eingesetzten Empfänger so programmiert, dass die Messung automatisch nach dem Erreichen einer gewünschten Koordinatenqualität (KQ) stoppt. Bei KQ handelt es sich um einen statistischen Schätzwert für die reale Koordinatenqualität, der auf einer

Standardabweichung aus der empfängerinternen Positionsberechnung und einigen zusätzlichen empirischen Annahmen basiert [LEICA 2000]. Er ist so ausgelegt, dass die im Empfänger berechnete Position mit einer Wahrscheinlichkeit von 66 % max. um den Wert KQ von der wahren Position abweicht.

Variante 1
Nach einer kurzen Einlaufphase (2-3 Min.) wird die Messung im Messmodus <i>MaxGenauigkeit</i> (Empfang von „guten“ GPS-Signalen = höchste erreichbare Positionsqualität) gestartet. Sobald eine Lagequalität (2D-KQ) von < 1 m vorliegt, stoppt der Empfänger die Messung automatisch und speichert den Punkt mit den jeweiligen Attributdaten ab. Um Vergleichswerte zu erhalten, sollte die Messung mehrmals wiederholt werden. Die geforderte KQ wird nur dann erreicht, wenn sowohl DGPS-Korrekturdaten als auch eine ausreichende Anzahl an „guten“ Satellitensignalen zur Verfügung stehen. Sind beide Bedingungen erfüllt, aber das KQ-Kriterium wird trotzdem nicht erreicht, dann beendet der Beobachter die Messung nach 10 Min. manuell und fährt mit Variante 2 fort. Kann kein Korrekturdatensignal an diesem Punkt empfangen werden, dann werden mehrere Messungen einer dann vorliegenden Navigationslösung (Messdauer 10 Min.) durchgeführt. Ob eine DGPS- oder Navigationslösung vorliegt, ist im abgespeicherten Datensatz erkennbar und kann später analysiert werden.
Variante 2
Start der Messung im Modus <i>MaxEmpfang</i> (Empfang auch von „schlechten“ GPS-Signalen = evtl. geringere Positionierungsqualität, aber höhere Satellitenanzahl) und Durchführung der Messung unter den gleichen Abbruch- und Wiederholungskriterien wie bei Variante 1. Liegen schwierige Empfangsbedingungen am Inventurpunkt vor, dann sollte immer mit Variante 2 begonnen werden.
Variante 3
Ist keine statische GPS-Punktmessung nach mehrmaligen Versuchen direkt am Probestflächenmittelpunkt möglich, dann erfolgt eine indirekte Einmessung mit Ultraschallentfernungsmesser und Kompass von einem exzentrischen GPS-Punkt aus. Die Koordinaten des Inventurpunktes können dabei direkt im GS50 berechnet werden.

Tabelle 7-1: Messvarianten der GPS-Inventurpunktmessung NPV

☞ Analyse der Messergebnisse

Eine Analyse hinsichtlich der vom Empfänger angegebenen Lagequalität ergab, dass von den 1012 vermessenen Inventurpunkten 78,5 % eine Lagequalität von unter einem Meter aufweisen (s. Abb. 7-16). Bei 89,9 % ist die Lagequalität besser als 5 m und bei 82 Punkten also 98 % besser als 10 m. Nur bei 16 der Inventurpunkte ist die Lagequalität schlechter als 10 m. Vergleicht man die Ergebnisse der einzelnen Messtrupps, so zeigen sich größere Unterschiede. Während bei Trupp 1 nur 1,8 % der Messungen eine Lagequalität von schlechter als 5m aufweisen, sind dies bei Trupp 2 16,1% und bei Trupp 3 sogar 23,3 %. Der Grund für die unterschiedliche Messqualität scheint im unterschiedlichen Empfang des Korrektursignals zu liegen. Während Trupp 1 bei über 99% der Messungen ein Korrektursignal empfangen konnte,

gelang dies Trupp 2 bei 75,3% der Messungen und Trupp 3 nur bei 63,9% der Messungen. Dabei zeigt sich der zu erwartende Zusammenhang zwischen schlechter Lagequalität und dem Ausbleiben des Korrektursignals. Bei einer Lagequalität von schlechter als 5 m liegt der Anteil von Inventurpunkten ohne Empfang eines Korrektursignals je nach Inventurtrupp zwischen 82 und 94 %. Da alle Trupps in den gleichen Waldgebieten eingesetzt wurden, scheiden die Geländebeziehungen als Erklärung für den unterschiedlichen Empfang aus. Vielmehr scheint der Grund in der unterschiedlichen Qualität der Decoder zu liegen, die daraufhin ausgetauscht wurden. Da es sich bei der Angabe „Koordinatenqualität“ nur um einen statistischen Wert handelt, stellt sich die Frage inwieweit dieser Rückschlüsse auf die **realen** Lage- und Höhenabweichung zulässt. Diese Fragestellung wurde bereits im Kap. 5.2 anhand von Testmessungen auf 21 bekannten Punkten bei voller Belaubung überprüft und ergab, dass KQ als Abschätzung für die Lage- und Höhenabweichung durchaus verwendet werden kann.

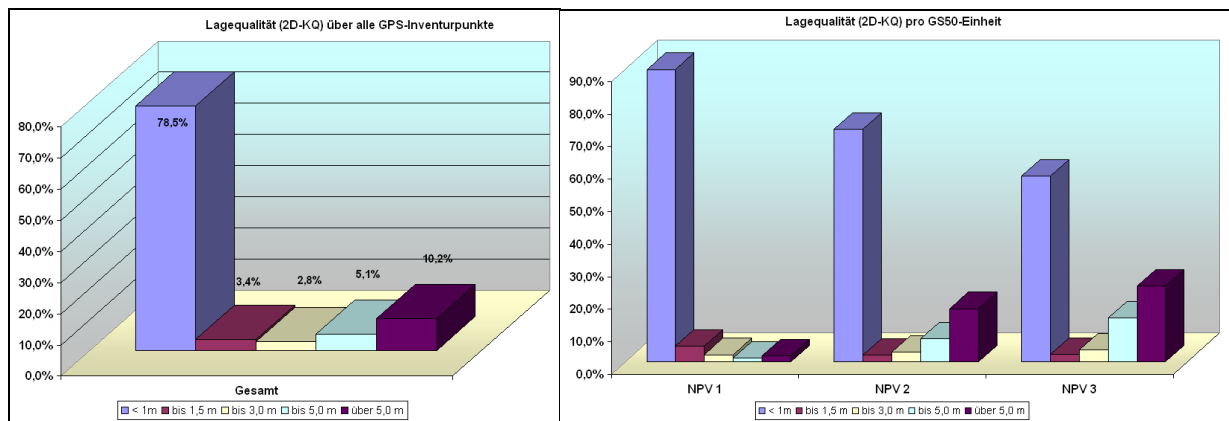


Abbildung 7-16: Lagequalität (2D-KQ) über alle Inventurpunkte und pro GS50-Einheit

☛ Fazit

Trotz anfänglicher Skepsis aufgrund der zusätzlichen Ausrüstungsgegenstände und der damit verbundenen Transporterschweren konnten die GPS-Messungen voll in den Arbeitsfluss der Waldinventur integriert werden. Angekommen am Inventurpunkt wurde sofort die GPS-Antenne aufgestellt und mit der Messung begonnen. Parallel zu der Eingabe der Inventurdaten in das mobile Datenerfassungsgerät kann auch der GPS-Empfänger beobachtet und die notwendigen Arbeitsschritte im Messablauf durchgeführt werden. Lediglich bei etwa 30 Inventurpunkten war während der Aufnahmedauer keine Position verfügbar und die Messung musste abgebrochen werden. Eine indirekte Einmessung wurde aus Zeitgründen verworfen, so dass diese Inventurpunkte zu einem späteren Zeitpunkt erneut angegangen wurden. Das eingesetzte Rucksacksystem GS50 hat die Erwartungen hinsichtlich Bedienung und Zuverlässigkeit erfüllt. Während der sechsmonatigen Messphase kam es zu keinem Geräteausfall und die erzielten Ergebnisse liegen im Rahmen der Erwartungen, nur der eingesetzte DGPS-Decoder muss für zukünftige Einsätze ausgetauscht werden. Auf Grund der Erkenntnisse aus den Testmessungen und punktuellen Wiederholungsmessungen kann davon ausgegangen werden, dass die mit dem hier vorgestellten Beobachtungsverfahren und eingesetzten DGPS-System aufgenommenen Inventurpunkte zu mehr als 80% mit einer Lagegenauigkeit von besser fünf Metern vorliegen. Damit wurde ein Hauptziel, nämlich die Erhöhung der Koordinatenqualität mit vertretbarem Aufwand, erreicht. Auch die Navigation zu Inventurpunkten mit Handheld Geräten hat sich in ersten praktischen Einsätzen bewährt. Damit steht jetzt ein operationell einsetzbares System zur Vermessung und Navigation von bzw. zu Inventurpunkten zur Verfügung.

☛ Ausblick

Auf Basis der bisher gemachten Erfahrungen sollen in den nächsten Jahren alle 5859 Inventurpunkte im Nationalpark mit dem GS50-System eingemessen und deren Ergebnisse in die FE-DB übernommen werden [CZAJA 2003]. Zudem ist im Rahmen der Hochlageninventur erstmals der Einsatz von GPS-Handheldgeräten zum Auffinden der Inventurpunkte geplant. Um den lückenhaften Empfang von DGPS-Korrektursignalen und die erreichbare Positionsgenauigkeit weiter zu verbessern, ist für die Bereiche mit Mobilfunkempfang der Einsatz eines GSM-Modems vorgesehen. Der Einsatz von GS50-Empfängern als Referenzstation zur Abdeckung von Lücken beim Korrektursignalempfang wird nicht weiter verfolgt, da die Reichweite der Datenfunkmodems im Wald sehr gering und der notwendige Aufwand bei den Messungen und der Auswertung für den Einsatz im Rahmen von Inventurarbeiten zu hoch erscheint.

7.4.2. Verknüpfungspunkte von Informationsschichten

Das Ziel des parallel durchgeführten HTO-Teilprojektes 33-8 war es, anhand mehrerer Testgebiete im Nationalparkgebiet das Potential verschiedener Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen zu überprüfen (LIDAR, digitale Luftbildaufnahmen, terrestrische Photogrammetrie) und durch Kombination der aus den verschiedenen Verfahren abgeleiteten Daten(-schichten), einen optimierten Methodenmix für die Ableitung von Waldstrukturen zu entwickeln (s. auch Kap. 4.5.3). Für die anschließende raumbezogene Analyse der einzelnen Datenschichten war sicherzustellen, dass die verwendeten Pass-, Inventur- und Anschlusspunkte für die Objektaufnahme der Referenzflächen mit einer für ihre Zwecke ausreichenden Positionsgenauigkeit vorliegen. Im Fall der Pass- und Anschlusspunkte war die geforderte Lage- und Höhengenaugigkeit von $< 0,10$ m nur mit Hilfe des differentiellen GPS-Verfahrens im PostProcessing unter Einsatz des hochgenauen Präzisions-Empfängers SR530 von Leica Geosystems mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erreichbar. Das angewendete Messkonzept beinhaltet daher die folgenden Arbeitsschritte [CZAJA 2003]:



Abbildung 7-17: GPS-Passpunktmessung

- Auswahl von 5-10 geeigneten Trigonometrischen Punkten (TP) pro Testgebiet unter Beachtung der Punktverteilung und Abschattungssituation.
- Erkundung und Vermarkung von zwei geeigneten Standpunkten für lokale GPS-Referenzstationen im Altpark und Erweiterungsgebiet mit Basislinienlängen < 10 km. Statische Einmessung der Referenzstationen über mindestens vier bekannte TP's im ETRS89-System (Doppelbeobachtungen, mind. 30 min.) und Basislinienauswertung in der GPS-Auswertesoftware SKI Pro (Leica Geosystems) unter Beachtung einer korrekten Mehrdeutigkeitslösung.
- Erkundung und Vermarkung (Asphaltnagel, Holzpflock bodengleich, weiße Bodenplatte) von 10-15 geeigneten Passpunkten für die Befliegung (möglichst geringe Abschattungen, gute Reflexionseigenschaften Boden, eindeutige Identifizierung). Dabei musste auf eine gute Verteilung der Passpunkte im Messgebiet geachtet werden.
- Einmessung der Pass- und Trigonometrischen Punkte im statischen Messmodus, mit mind. 30 min. Beobachtungsdauer bei einer Messfrequenz von 1 Hz. Bei schwierigen Messbedingungen Wiederholung der Messung zu einer anderen Uhrzeit. Doppelmessung, falls zeitlich möglich
- Basislinienauswertung in der GPS-Auswertesoftware SKI Pro unter Beachtung einer korrekten Mehrdeutigkeitslösung. Dies erfordert auf Grund der häufig gestörten GPS-Signale mit vielen cycleslips eine gewisse Erfahrung und mehrere Durchläufe.
- Berechnung einer 3D-Helmert-Transformation ETRS89 -> GK über die aufgenommenen TP's pro Testgebiet und unter Berücksichtigung der Quasigeoidhöhen des EGG97.
- Transformation aller Passpunkte in das GK-Koordinatensystem pro Testgebiet.

Insgesamt wurden auf diese Weise 44 Passpunkte für die Befliegung und 22 Trigonometrischen Punkte für die Transformation bestimmt. Die Analyse der Ergebnisse ergab, dass mit diesem Vorgehen die geforderte Genauigkeit trotz der zum Teil sehr schwierigen Messbedingungen für eine hochgenaue GPS-Positionierung erreicht werden kann. Sowohl die doppelt gemessenen Punkte weisen nur Differenzen von < 5 cm in der Lage und Höhe auf als auch die Restklaffungen bei der Bestimmung der Transformationsparameter liegen unter den Anforderungen. Diese Ergebnisse wurden auch durch die unabhängige Einmessung von ca. 40 % der hier bestimmten Punkte in der Arbeit von [FISCHER, KNÖRZER 2003] bestätigt. Es ist aber anzumerken, dass unter diesen Bedingungen die hochgenaue GPS-Bestimmung einen höheren Aufwand und die notwendige geodätische Erfahrungen erfordert. So hat sich die oben angegebene (relative hohe) TP- und Passpunktanzahl als sinnvoll erwiesen, da ca. 20 % der Punkte sehr schwierig zu bestimmen waren und nicht in die endgültigen Ergebnisse miteinbezogen werden konnten. Der Aufwand der GPS-Auswertung kann hierbei bis zu 40 % höher liegen als unter normalen GPS-Messbedingungen.

7.5. Satellitengestütztes Wildtiermonitoring



Abbildung 7-18: Rotwild mit GPS-GSM Halsband [ZAPF 2002]

Schon kurz nach der Gründung des Nationalparks Bayerischer Wald wurde verstärkt begonnen, das Verhalten und den Aufenthalt der verschiedenen Wildtierarten zu untersuchen und zu analysieren, um die Grundlagen für ein Nationalparkgerechtes Wildtiermanagement erarbeiten zu können. Dabei griff man zuerst auf visuelle Beobachtungsmethoden und ab Ende der 70er Jahre auf konventionelle Telemetrieverfahren (Funkpeilung) zurück.

Seit 2001 werden die neuartigen GPS-Halsbänder *GPS Plus* der Firma Vectronix-Aerospace für die satellitengestützte Ortung von Wildtieren an Rothirschen im Nationalpark Bayerischer Wald getestet (s. Abb. 7-18). Die Neuerungen liegen dabei in der Verwendung der neusten und damit robusteren GPS-MicroChip-Technologie sowie in der weltweit ersten Realisierung einer automatischen Ergebnisübermittlung per Mobilfunk (GSM) im Jahre 2002. Seitdem können max. alle 3 Stunden die bis dahin ermittelten

Positionen eines Tieres per SMS an einen zentralen Server geschickt werden und stehen unmittelbar für Analysen zur Verfügung. Bisher konnten die Telemetriedaten erst nach dem erneuten Einfangen der Tiere im darauffolgenden Winter ausgelesen und analysiert werden. Die damit behandelten Fragestellungen beschäftigen sich inhaltlich u. a. mit

- der Größe und Nutzung der Streifgebiete,
- der Expositionsverteilung (s. Abb. 7-19),
- den artspezifischen Aufenthaltsschwerpunkten,
- der Nutzung von typischen Waldgesellschaften
- oder der Aktivitätsrhythmik der Tiere.

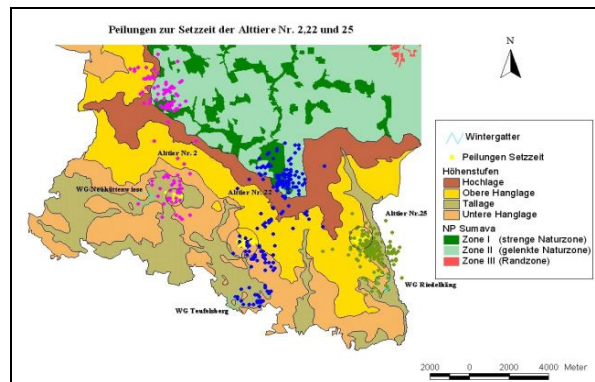


Abbildung 7-19: GIS-gestütztes Wildtiermonitoring im NP Bayerischer Wald [ZAPF 2002]

Bei den eingesetzten GPS-Sensoren handelt es sich um L1-Code-Empfänger, die ihre Positionsinformationen im NMEA-Datenformat ausgeben [VECTRO 2006] und unter den gleichen forstlichen Bedingungen eingesetzt werden, wie GPS-Empfänger bei den oben beschriebenen, personenbezogenen Applikation. Allerdings handelt es sich hier ausnahmslos um eine dynamische Positionsbestimmung und die Anforderungen hinsichtlich der Lage- und Höhengenaugigkeit sind beim Wildtiermonitoring i. d.R. wesentlich geringer. Trotzdem ergeben sich bei der Analyse der Positionsqualität die gleichen Fragestellungen und es stehen hierfür auch nur die bereits in Kapitel 5 ausführlich diskutierten Parameter zur Verfügung. Die mit solchen GPS-Halsbändern erreichbaren Genauigkeiten wurden anhand von statischen Vergleichsmessungen mit einem handelsüblichen GPS-Handheld und einem geodätischem Präzision-Empfänger im Kranzberger Forst und im Nationalpark Bayerischer Wald näher untersucht sowie ausführlich in der Arbeit von [ZAPF 2002] dokumentiert. Dabei wurde das Halsband entweder 30 Min. oder länger als 12 h auf koordinatenmäßig bekannten Festpunkten positioniert. Nach der Filterung von Ausreißern (z. B. HDOP > 5) ergaben die Sendertests eine mittlere Abweichung von bekannten Referenzpunkten von 12 bis 23 m in der Lage und und 13 bis 35 m in der Höhe. Dies ist eine wesentliche Verbesserung im Gegensatz zu den bisherigen über Radiotelemetrie gemessenen Daten, die in der Regel eine Positionsgenauigkeit von ungefähr 100 m aufwiesen.

8. Schlussbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Thematik eines *sensorgestützten mobilen GIS (SmobGIS)* umfassend durch zwei inhaltliche Schwerpunkte aufgearbeitet. Der erste Teil beschäftigt sich mit den Grundlagen und Begriffen von mobilen raumbezogenen Informationssystemen, der Definition und Beschreibung der vier Hauptkomponenten eines SmobGIS inklusive einer Zusammenfassung der für eine Konzeption relevanten Kriterien und den für die Einzelkomponenten zur Verfügung stehenden Technologien sowie der Realisierung eines SmobGIS anhand aktueller Beispiele bei der waldökologischen Objektaufnahme. Damit liefert diese Arbeit einen Beitrag zu einer ausführlicheren theoretischen, konzeptionellen und aktuellen Beschreibung der Technologie mobiler GIS, zu der bisher nur wenig detaillierte Fachliteratur existiert.

Im zweiten Teil konnte durch die Diskussion praxisrelevanter Fragestellungen und der Vorstellung neuer Lösungsansätze im Zusammenhang mit dem alleinigen oder kombinierten Einsatz von GPS und handgetragenen 3D-Polarsensoren sowohl das Potential als auch die Grenzen dieser Technologien unter den schwierigen Messbedingungen eines Naturwaldes im Mittelgebirgsraum aufgezeigt sowie die Bedeutung einer ausreichend genauen und zuverlässigen (sensorgestützten) Position für die mobile Geodatenverarbeitung anhand diverser Beispiele verdeutlicht werden. Unabhängig von der verwendeten Sensortechnologie sind dabei Bewertungskriterien notwendig, die es auch fachfremden Nutzern von SmobGIS erlauben, eine schnelle und korrekte Aussage über die Positionsqualität vor Ort zu treffen. Hierzu wurden in dieser Arbeit einige Ansätze im Bereich der GPS-Positionsraumdaten vorgestellt und bewertet.

Hinsichtlich der GNSS-Sensortechnologie bleibt festzuhalten, dass bereits heute die satellitengestützte Positionierung unter forstlichen Bedingungen für zahlreiche Applikationen im Forstwesen eine geeignete Positionierungstechnologie darstellt. Die derzeitige Modernisierung der bestehenden GNSS-Programme GPS und GLONASS sowie die Realisierung des Europäischen Satellitenpositionierungssystems GALILEO werden in absehbarer Zukunft für eine spürbare Verbesserung hinsichtlich der Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der GNSS-Positionierung unter schwierigen Messbedingungen sorgen. Zum einen können neue Beobachtungsgrößen (z. B. GPS L2C) genutzt werden und zum anderen steht ungefähr die doppelte Anzahl an Satelliten bei der kombinierten Nutzung der Systeme zur Verfügung.

Dennoch wird es auch mit diesen Verbesserungen nicht überall und jederzeit möglich bzw. sinnvoll sein, eine GNSS-Position zu bestimmen. Der kombinierte (hybride) Einsatz verschiedener, sich ergänzender Technologien, scheint im Hinblick auf eine zuverlässige und flexible Positionierung von Objekten weiterhin vielversprechender. Neben der Kombination zweier unterschiedlicher Sensortechnologien wurde daher in dieser Arbeit mit dem DGMMatch-Verfahren ein weiterer innovativer Ansatz vorgestellt, der sowohl gängige Sensortechnologie als auch die flächenhaften Geo-Informationen eines Geländemodells nutzt. Auch wenn aus Kostengründen nicht damit zu rechnen ist, dass in naher Zukunft flächendeckend digitale Geländemodelle mit einer Genauigkeit < 1 m vorliegen, so haben die hier diskutierten Beispiele das Potential des Verfahrens für den Einsatz in „GNSS-feindlichen“ Umgebungen verdeutlicht. Weitere Untersuchungen anhand der in Kapitel 6.4.5.3 aufgezeigten Fragestellungen wären daher wünschenswert.

Die Zusammenarbeit mit Vertretern anderer Fachrichtungen (Forstwesen, Waldökologie) im Rahmen des HTO-Projektes hat gezeigt, wie mobile, raumbezogene Informations- und Messtechnologie bestehende Arbeitsabläufe verbessern oder sogar gänzlich neue Möglichkeiten schaffen kann. Der wachsende Bedarf an qualitativ hochwertigen Geodaten vor Ort und die weiterhin sehr rasanten Entwicklungen in der Informations- und Kommunikationstechnologie werden sich positiv auf die zukünftigen Generationen mobiler, sensorgestützter GIS auswirken. Es ist davon auszugehen, dass in absehbarer Zeit „Alleskönner“ in Form von *Pedestrian Mobile Mapping Systemen* zur Verfügung stehen, die der vom Präsidenten des Bayerischen Landesvermessungsamtes Prof. Günter Nagel im Jahr 2000 beschriebenen Version eines *Likamaten* für die Katastervermessung im Jahr 2025 sehr nahe kommen oder diese bereits übertreffen werden (s. Abb. 8-1).

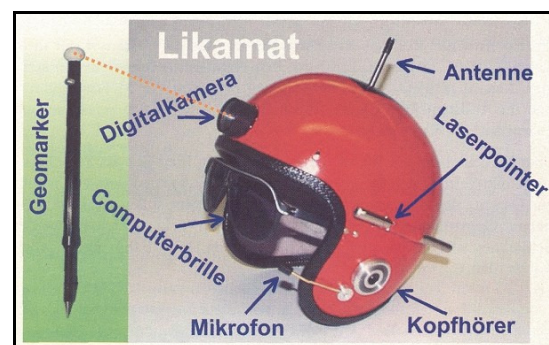


Abbildung 8-1: Likamat [NAGEL 2000]

Abkürzungsverzeichnis

AGPS	Assisted GPS
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ALF	Accurate Positioning by Low Frequency
AOA	Angel of Arrival
BayStMLF	Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten
BGAN	Regional Broadband Global Area Network
BHD	Brusthöhendurchmesser
BT	Bluetooth
BWI	Bundeswaldinventur
CAF	Computer Aided Fieldwork
CEP	Circular Error Probable
DBFI	Dauerbeobachtungsfläche
DFK	Digitale Flurkarte
DGM	Digitales Geländemodell
DGPS	Differentielles GPS
DHHN	Deutsches Haupthöhennetz
DIN	Deutsche Industrienorm
DOP	Dilution of Precision
DXF	Data Exchange Format
EDM	Elektronischer Distanzmesser
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EPE	Estimated Position Error
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETRS	European Terrestrial Reference System
FE-DB	Forsteinrichtungsdatenbank
FTP	File Transfer Protocol
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GGA	Global Positioning System Fix Data (NMEA-Datenformat)
GIS	Geoinformationssysteme
GK	Gauß-Krüger
GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSA	GPS DOP and active satellites (NMEA-Datenformat)
GSM	Global System for Mobile Communication
GSV	Satellites in view (NMEA-Datenformat)
GUI	Graphical User Interface
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HEPS	Hochgenauer Echtzeit-Positionierungsdienst
HMD	Head Mounted Display
HTO	High Tech Offensive Bayern
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INS	Inertialsystem
IS	Informationssystem
ITRS	International Terrestrial Reference System
KONMEA	Konvertierung und Auswertung von NMEA-Daten
KQ	Koordinatenqualität
LADGPS	Local Area DGPS
LBS	Location Based Services
LEO	Low Earth Orbit
LIDAR	Light Detection and Ranging
LRF	Laser Range Finder

MEO	Medium Earth Orbit
MOBRIS	Mobile Raumbezogene Informationssysteme
MMI	Man Machine Interface
MMS	Mobile Mapping Systems
MSS	Multi Sensor Systems
NMEA	National Marine Electronics Association
NPV	Nationalparkverwaltung
ODBC	Open DataBase Connectivity
OODBMS	Objektorientiertes DBMS
ORDBMS	Objektrelationales DBMS
PDA	Personal Digital Assistant
PDGPS	Präzises DGPS
PRC	Pseudorange Correction
RDBMS	Relationales Datenbankmanagementsystem
RFID	Radio Frequency Identification
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RIS	Raumbezogenes Informationssystem
RRC	Range Rate Correction
RSS	Received Signal Strength
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Service
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
SmobGIS	Sensorgestütztes mobiles Geoinformationssystem
SNR	Signal to Noise Ratio
SPP	Single Point Positioning
TDOA	Time Difference of Arrival
TDOP	Time Dilution of Precision
TOA	Time of Arrival
UERE	User Equivalent Range Error
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTC	Universal Time Coordinated
UTM	Universale Transversale Mercatorprojektion
VR	Virtuelle Referenzstation
WADGPS	Wide Area DGPS
WFS	Web Feature Service
WGS	World Geodetic System
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Web Mapping Service
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Grundgedanke eines SmobGIS.....	6
Abbildung 1-2: Abhängigkeiten zwischen Qualität, Kosten und Zeit.....	8
Abbildung 1-3: Verknüpfung von Informationsschichten [nach HEURICH 2002].....	9
Abbildung 2-1: Schalenweiser IS-Aufbau.....	11
Abbildung 2-2: Komponentenweiser IS-Aufbau.....	11
Abbildung 2-3: Mehrstufiges Informationssystem [nach BARTELME 2000].....	11
Abbildung 2-4: Client-Server-Prinzip mit Agent und Broker.....	12
Abbildung 2-5: Verteilte Systeme.....	12
Abbildung 2-6: Standardarchitektur eines GIS.....	13
Abbildung 2-7: Referenzflächen.....	14
Abbildung 2-8: Geodätisches Datum.....	14
Abbildung 2-9: Orientierungselemente.....	15
Abbildung 2-10: Ellipsoidisches Bezugssystem.....	15
Abbildung 2-11: GK-Meridianstreifensystem.....	17
Abbildung 2-12: Soldner Berührkugel [RUMMEL 2005].....	18
Abbildung 2-13: Ortsungebundene Informationsnutzung.....	20
Abbildung 2-14: Begriffe mobiler raumbezogener Informationssysteme.....	20
Abbildung 2-15: Kern- und Applikationstechnologien MOBRIS.....	21
Abbildung 2-16: Raum als Informationsfilter.....	21
Abbildung 2-17: Entwicklung mobiler GIS.....	22
Abbildung 2-18: Anwendungsbeispiele von Mobile Mapping Systems.....	23
Abbildung 2-19: Einflussfaktoren LBS.....	24
Abbildung 2-20: LBS Partner [WUNDERLICH 2003].....	24
Abbildung 2-21: Hauptkomponenten LBS.....	25
Abbildung 2-22: Anwendungsbereiche mobiler RIS [nach INGENSAND 2002].....	26
Abbildung 3-1: Varianten mobiler GIS [nach RESNIK 2001].....	27
Abbildung 3-2: Grundbausteine mobiler GIS.....	27
Abbildung 3-3: Hauptkomponenten eines sensorgestützten mobilen GIS.....	28
Abbildung 3-4: MMI mobiler GIS [INGENSAND 2002].....	30
Abbildung 3-5: Augmented Reality.....	30
Abbildung 3-6: Produktbeispiele PDA, Handheld-PC, Pen-Computer und feldtaugliches Notebook.....	32
Abbildung 3-7: Technisches Konzept, Produkt- und Anwendungsbeispiel WearComp [CZAJA 2002a].....	33
Abbildung 3-8: Konzept WearComp für mobile GIS [INGENSAND 2000].....	33
Abbildung 3-9: Beispiel WearComp mobiles GIS [HUNTER 2004].....	33
Abbildung 3-10: Standardarchitektur Desktop + Internet-GIS.....	34
Abbildung 3-11: Standardarchitektur High-End-GIS.....	34
Abbildung 3-12: Unterschiede der GIS-DBMS-Konzepte.....	34
Abbildung 3-13: Datenaustausch zwischen mobilem und zentralen GIS.....	35
Abbildung 3-14: Mobile Kommunikationstechnik [nach KELLERER 2002].....	36
Abbildung 3-15: UMTS Zellen [ROTH 2002].....	37
Abbildung 3-16: Überblick Positionierungssysteme [nach SCHÄFER 2003].....	39
Abbildung 3-17: Prinzip Map Matching [SCOUT 2004].....	40
Abbildung 3-18: GPS-Signale u. Korrelation [ILLNER 1995].....	40
Abbildung 3-19: GPS-Positionslösung als Schnittpunkt von Hyperboloiden [WUNDERLICH 1993].....	40
Abbildung 3-20: GPS-Phasenmehdeutigkeit [SCHERRER 1987].....	41
Abbildung 3-21: GPS-Positionierungsverfahren.....	41
Abbildung 3-22: Abdeckung SBAS-Systeme [ESA 2004].....	43
Abbildung 3-23: EGNOS Raumsegment [ESA 2004].....	43
Abbildung 3-24: Hyperbel-Navigationsverfahren LORAN-C.....	44
Abbildung 3-25: Zellortung in Mobilfunknetzen [nach ROTH 2002].....	45
Abbildung 3-26: TDOA Verfahren.....	46
Abbildung 3-27: Polare Punktbestimmung.....	47
Abbildung 3-28: Produktbeispiele handgetragener Polarsensoren.....	48
Abbildung 4-1: Nationalpark „Bayerischer Wald“.....	51
Abbildung 4-2: Totholzflächen.....	51
Abbildung 4-3: Digitaler Datenkreislauf NPV.....	52
Abbildung 4-4: HTO-Verbundprojekt 33.....	52
Abbildung 4-5: Grundkonzept des HTO-Projektes 33-2.....	53

Abbildung 4-6: Systemkonzept Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ [HUBER 2002].....	55
Abbildung 4-7: Auszug Meta-Datenmodell Referenz-GIS [HUBER 2002].....	56
Abbildung 4-8: Inhaltliche und physische Struktur [HUBER 2002].....	56
Abbildung 4-9: Filesystem und RDBMS.....	56
Abbildung 4-10: Softwarearchitektur Geodatenserver [SCHEUGENPFLUG 2003].....	58
Abbildung 4-11: Anordnung von Probequadratflächen einer Dauerbeobachtungsfläche.....	59
Abbildung 4-12: Manuell erstellter Bestandsaufriß eines belassenen Windwurfs [JEHL 1995].....	60
Abbildung 4-13: Beispiel Objektklassenkatalog „Topographischer Objekte“.....	61
Abbildung 4-14: Inventurgitter.....	62
Abbildung 4-15: Baumplot Probekreisverfahren.....	62
Abbildung 4-16: Einmessung Inventurpunkte mit einseitigen Polygonzügen.....	63
Abbildung 4-17: konstruierte vs. reale Inventurpunktcoordinate.....	63
Abbildung 4-18: Digitaler Datenfluss Standardinventurverfahren BayStaFV.....	64
Abbildung 4-19: Inventur-Datenkategorien SmobGIS.....	65
Abbildung 4-20: Digitaler Datenfluss „Inventur“ mit SmobGIS.....	65
Abbildung 4-21: Inventurpunkttypen.....	66
Abbildung 4-22: TCR307.....	69
Abbildung 4-23: GPS CF-GPS (Pretec), etrex Summit (Garmin) und GPS500 (Leica).....	69
Abbildung 4-24: Laser Ace 300.....	69
Abbildung 4-25: ViA II Gürtle-PC mit RS232-Schnittstellenerweiterung.....	71
Abbildung 4-26: Dynamischer Einsatz Tablet-Notebook.....	71
Abbildung 4-27: Statischer Einsatz Tablet-Notebook.....	71
Abbildung 4-28: Konzept digitaler Datenfluss SmobGIS.....	73
Abbildung 5-1: Allgemeine Einflussfaktoren.....	76
Abbildung 5-2: Definition Beobachtungs- und Positionsraum.....	77
Abbildung 5-3: NMEA-0183 Datensatzstruktur und Beispieldatensätze.....	77
Abbildung 5-4: Empfängervergleich absolute GPS-Positionierung.....	78
Abbildung 5-5: DGPS-Verfahren in Echtzeit.....	79
Abbildung 5-6: Distanzabhängiger Fehler DGPS [MANNSFELD 1998].....	80
Abbildung 5-7: GPS-Antennenplatte.....	83
Abbildung 5-8: Kinematische Messung Traktlinie.....	84
Abbildung 5-9: Ergebnisplots Traktlinie.....	84
Abbildung 5-10: Aufbau GPS-Messung.....	86
Abbildung 5-11: KQ-Ergebnisse GPS-Lösungen GS50.....	87
Abbildung 5-12: KQ-Ergebnisse DGPS Lösungen GS50.....	87
Abbildung 5-13: etrex Display Navigation.....	87
Abbildung 5-14: Hauptfenster KONMEA.....	89
Abbildung 5-15: Ergebnisse Datenimport KONMEA.....	90
Abbildung 5-16: KONMEA-Menü <i>Anzeige</i>	90
Abbildung 5-17: KONMEA-Menü <i>Extra Plot GK</i>	91
Abbildung 5-18: Positionsspur mit Satellitenanzahl.....	91
Abbildung 5-19: Hohes DGPS-Korrekturdatenalter.....	92
Abbildung 5-20: Typisches DGPS-Korrekturdatenalter.....	92
Abbildung 5-21: SNR/Elevation Abschätzung < 25°.....	94
Abbildung 5-22: SNR/Elevation im Stangenholz.....	94
Abbildung 5-23: SIGMA- Δ -Gewichtsmodell.....	94
Abbildung 5-24: Überprüfung von NMEA-Datensätzen.....	95
Abbildung 5-25: SNR und Elevation vs. Lage- und Höhenabweichung im Stangenholz.....	95
Abbildung 5-26: Satellitenanzahl vs. Sollpunkt.....	95
Abbildung 5-27: Beispiel KONMEA Sat-Filter.....	96
Abbildung 5-28: Beispiel Höhenverlauf bei 3 Satelliten.....	96
Abbildung 5-29: Outage-Situation [WUNDERLICH 1993].....	98
Abbildung 5-30: Outage Positionsspur und stereographisches Sichtbarkeitsdiagramm.....	98
Abbildung 5-31: Beispiel lückenhafter Positionsraumdaten.....	98
Abbildung 5-32: Beispiel Cluster-Filter.....	100
Abbildung 5-33: v-Filter mit SNR/Elevation.....	100
Abbildung 5-34: v-Filter mit HDOP/Satellitenanzahl.....	100
Abbildung 5-35: Positionsspur nach v-Filter (s. o.).....	100
Abbildung 5-36: SubIntervall-Filter nach Zeit.....	101
Abbildung 5-37: Eingabe Epochen-Filter.....	101
Abbildung 5-38: Beipielergebnis DGPS-Nav-Filter.....	102
Abbildung 6-1: Koordinatensysteme bei Richtungsbestimmung mit Magnetsensor.....	105

Abbildung 6-2: Impulsmessverfahren	106
Abbildung 6-3: Brush Filter LaserAce 300	107
Abbildung 6-4: Fotostativ	107
Abbildung 6-5: Primatest.....	107
Abbildung 6-6: Einfluss Neigung auf Azimutmessung	108
Abbildung 6-7: Längs- und Querabweichung.....	108
Abbildung 6-8: Abschätzung Richtungsfehler.....	109
Abbildung 6-9: Streckenreduktionen	109
Abbildung 6-10: <i>OptoLot</i> LaserAce 300.....	112
Abbildung 6-11: Ursachen für Standpunktexzentrizität e	112
Abbildung 6-12: Richtungseinfluss von e	112
Abbildung 6-13: Terrestrische 3D-Punktbestimmung	113
Abbildung 6-14: Testnetz Alte Pinakothek	115
Abbildung 6-15: Einzelpunktbestimmung Testnetz.....	115
Abbildung 6-16: Messergebnisse Einzelpunktbestimmung LA300.....	115
Abbildung 6-17: Beidseitig angeschlossener 3D-Polarzug (Lage)	116
Abbildung 6-18: f_L, f_Q 3D-Polarzug	117
Abbildung 6-19: Fehlerfortpflanzung im Polygon- und Polarzug.....	117
Abbildung 6-20: Übersicht Polarzüge Kranzberger Forst	118
Abbildung 6-21: Polarzugmessung.....	118
Abbildung 6-22: LRF-Messeditor ArcPad	120
Abbildung 6-23: Einpassung Strahlenbündel in DGM.....	121
Abbildung 6-24: Komponenten und Messprinzip flugzeuggestütztes Laserscanning [KRAUS 2004]	122
Abbildung 6-25: Testgebiete Laserscanningbefliegung	123
Abbildung 6-26: DGM-Ausschnitt Testgebiet C (Schachtenau).....	125
Abbildung 6-27: DGM-Ausschnitt Testgebiet E (Scheuereck)	125
Abbildung 6-28: DGM-Ausschnitt Testgebiet E (Rehruck).....	125
Abbildung 6-29: Definition DGM-Ausschnitt der DGMMatch-Auswertung.....	127
Abbildung 6-30: Berechnung dH_m pro Rasterpunkt.....	127
Abbildung 6-31: Konturplot dH_m Rasterweite 1 m.....	128
Abbildung 6-32: Konturplot dH_m Rasterweite 0.25 m	128
Abbildung 6-33: Plot DGM-Ausdehnung	128
Abbildung 6-34: Plot LRF-Zielpunkte.....	128
Abbildung 6-35: 3D-Visualisierung des verwendeten DGM-Bereiches	128
Abbildung 6-36: Einfluss Geländeform STANG1	132
Abbildung 6-37: Einfluss Geländeform SCHEU3	132
Abbildung 6-38: Darstellung u. Messung Fels (oben/unten).....	133
Abbildung 6-39: Darstellung und Messung Mulde.....	133
Abbildung 6-40: Fehlinterpretationen im DGM (Zacken).....	133
Abbildung 6-41: Grober DGM-Fehler (ca. 6 m).....	133
Abbildung 6-42: Entscheidungshilfe Kontur-Plot.....	134
Abbildung 6-43: Entscheidungshilfe Höhenlinien	134
Abbildung 6-44: Entscheidungshilfe Neigung.....	134
Abbildung 6-45: Entscheidungshilfe Neigungsänderung.....	134
Abbildung 6-46: Profilinie mit Ableitungen.....	135
Abbildung 6-47: Profilinie ohne Ableitungen	135
Abbildung 6-48: 3D-Visualisierung DGM-Ausschnitt <i>profil</i>	135
Abbildung 6-49: 2D-Kontour-Plot mit Selektionsliste.....	135
Abbildung 6-50: Entscheidungshilfe Lösungsraum	136
Abbildung 6-51: Entscheidungshilfe Histogramm.....	136
Abbildung 6-52: Entscheidungshilfe Grenzwert dH_m	136
Abbildung 6-53: Gewichtsfunktionen Fleckschwerpunkt	138
Abbildung 6-54: Beispiel Fleckenlösung	138
Abbildung 6-55: Sequentielle DGMMatch-Berechnung mit Flecken-Lösung pro Standpunkt.....	140
Abbildung 6-56: Sequentieller Vergleich der Positionsergebnisse (Schwerpunkte Flecken)	140
Abbildung 6-57: Flussdiagramm DGMMatch V1.65.....	142
Abbildung 6-58: Ergebnis Flecken-Lösung der Großraum-Auswertung Testpunkt MISCH2 (Rasterplot).....	144
Abbildung 6-59: Ergebnis Flecken-Lösung der Großraum-Auswertung Testpunkt SCHEU3 (Rasterplot)	145
Abbildung 6-60: GUI von LRF-DGMMatch.....	146
Abbildung 7-1: Datenfluss "Dauerbeobachtungsflächen"	147
Abbildung 7-2: Datenmodell DBFI-DB	147
Abbildung 7-3: Darstellung DBFI-Objekte in ArcView 3.2.....	148

Abbildung 7-4: Objektaufnahme DBFI in ArcPad 6	148
Abbildung 7-5: DBFI-Feldmessung mit SmobGIS	149
Abbildung 7-6: DGPS-Aufnahme Wanderweg	150
Abbildung 7-7: Visualisierung Wanderweg ArcView	150
Abbildung 7-8: ArcPad-Beispielfunktionen der Applikation <i>TopoNPV</i>	150
Abbildung 7-9: Objektdaten und Hintergrundgrafik SmobGIS-Applikation „Inventur“	151
Abbildung 7-10: Beispiel für Baumplot SmobGIS-Applikation "Inventur"	152
Abbildung 7-11: Trakt Bundeswaldinventur	152
Abbildung 7-12: <i>BWI-Nav</i> Hauptbildschirm Navigation	153
Abbildung 7-13: Navigation zur Traktecke B (=2)	154
Abbildung 7-14: Darstellung Baumplot	154
Abbildung 7-15: GPS-Messung Inventurpunkt Nationalpark Bayerischer Wald	156
Abbildung 7-16: Lagequalität (2D-KQ) über alle Inventurpunkte und pro GS50-Einheit	157
Abbildung 7-17: GPS-Passpunktmessung	158
Abbildung 7-18: Rotwild mit GPS-GSM Halsband [ZAPF 2002]	159
Abbildung 7-19: GIS-gestütztes Wildtiermonitoring im NP Bayerischer Wald [ZAPF 2002]	159
Abbildung 8-1: Likamat [NAGEL 2000]	160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Anwendungsfälle beim Einsatz mobiler GIS	7
Tabelle 1-2: Vorteile der „vor Ort“ Verarbeitung raumbezogener Daten.....	8
Tabelle 2-1: Geodatentypen	13
Tabelle 2-2: Wichtige Referenzellipsoide	14
Tabelle 2-3: Referenzflächen Erdfigur.....	14
Tabelle 2-4: Geodätische Bezugssysteme	16
Tabelle 2-5: Mobile Computing Begriffe aus Benutzersicht	19
Tabelle 2-6: Mobile Computing Begriffe aus Netzwerksicht	19
Tabelle 3-1: Kriterienkatalog mobile Recheneinheit	29
Tabelle 3-2: Ein- und Ausgabe Technologien	30
Tabelle 3-3: Geräteklassen mobiler Recheneinheiten (Stand: 08 / 2005).....	31
Tabelle 3-4: Eigenschaften von DBMS-Konzepten.....	34
Tabelle 3-5: Merkmale von Systemarchitekturen mobiler GIS	35
Tabelle 3-6: Kenngrößen UMTS-Zellen	37
Tabelle 3-7: Übertragungszeiten verschiedener Kommunikationstechniken.....	38
Tabelle 3-8: GALILEO Dienste [nach RÜFFER, HEMMERT 2005]	44
Tabelle 3-9: Geschätzte GSM und UMTS Positionierungsgenauigkeiten [nach RETSCHER, MOK 2001].....	47
Tabelle 4-1: Kurzbeschreibung der ausgewählten Applikationen für SmobGIS	54
Tabelle 4-2: Übersicht Datenbestände Referenz-GIS [HUBER 2002].....	57
Tabelle 4-3: Beispiel Bayernkoordinate.....	63
Tabelle 4-4: Anforderungen Aufnahmepunkte HTO-Projekt 33-8 (Stand: 08/2002).....	67
Tabelle 4-5: Bewertung Positionierungstechnologien.....	68
Tabelle 4-6: Pflichtenheft Positionierungssystem (Auszug).....	68
Tabelle 4-7: Technische Daten Laser Ace 300 [MDL 2001].....	69
Tabelle 4-8: Pflichtenheft mobile Recheneinheit (Auszug).....	70
Tabelle 4-9: Technische Maximalforderungen an die mobile Recheneinheit.....	70
Tabelle 4-10: Pflichtenheft Applikationssoftware (Auszug)	72
Tabelle 5-1: Kriterien Positionsqualität [nach RÜFFER, HEMMERT 2005]	75
Tabelle 5-2: Einflussfaktoren GPS-Positionsqualität.....	76
Tabelle 5-3: Auswahlkriterien GPS-Sensorik.....	76
Tabelle 5-4: GPS/DGPS Fehlereinflüsse [nach WÜBBENA et al. 2000].....	80
Tabelle 5-5: Natürliche Alterklassen und Abschattungsgrad von Waldbeständen [nach StMLF 2005].....	81
Tabelle 5-6: Testpunkte Empfängervergleich 1.....	81
Tabelle 5-7: Ergebnisse GPS/DGPS Empfängervergleich 1	82
Tabelle 5-8: Untersuchungsparameter Empfängervergleich 2.....	83
Tabelle 5-9: Ergebnisse Empfängervergleich 2	83
Tabelle 5-10: Ergebnisse kinematische Messungen.....	84
Tabelle 5-11: Untersuchungsschwerpunkte Empfängervergleich 3	85
Tabelle 5-12: Testpunkte Empfängervergleich 3	85
Tabelle 5-13: Ergebnisse Empfängervergleich 3	85
Tabelle 5-14: Ergebnisse KQ-Testmessungen.....	86
Tabelle 5-15: Ergebnisse unterschiedlicher DGPS-Korrekturdaten.....	88
Tabelle 5-16: SNR-Wertebereiche.....	94
Tabelle 5-17: Vergleich statistischer 2D-Genauigkeitsmaße mit wahrer Lageabweichung	99
Tabelle 5-18: Testpunkte Positionsraum-Filter.....	102
Tabelle 5-19: Ergebnisse Multi-Filter 2	103
Tabelle 5-20: Ergebnisse Multi-Filter 3	103
Tabelle 6-1: Digitalkompass LaserAce 300 [MDL 2001]	106
Tabelle 6-2: EDM LaserAce 300 [MDL 2001]	106
Tabelle 6-3: Durchmesser Strahlkegel vs. Entfernung.....	107
Tabelle 6-4: Inklinometer LaserAce 300 [MDL 2001]	108
Tabelle 6-5: Querabweichung [m] bei variablem s und dt	109
Tabelle 6-6: Querabweichung bei festem dt und variablem s	109
Tabelle 6-7: Abschätzung relevanter Streckenkorrekturen und – reduktionen für $s = 50$ m.....	110
Tabelle 6-8: Abschätzung dz mit dH und dS	110
Tabelle 6-9: Aspekte der Objektanzielung und Standpunktzentrierung mit 3D-Polarsensoren.....	111
Tabelle 6-10: Abschätzung Standpunktexzentrizität e	112
Tabelle 6-11: Einfluss von e auf Richtungsmessung	112

Tabelle 6-12: Überblick der entwickelten ArcPad-Sensormodule	113
Tabelle 6-13: Abschätzung Lagefehler Einzelpunkt	114
Tabelle 6-14: Abschätzung Höhengenaugigkeit Einzelpunkt	114
Tabelle 6-15: Abschätzung f_L und f_Q 3D-Polarzug	118
Tabelle 6-16: Beschreibung Polarzüge Kranzberger Forst	119
Tabelle 6-17: 3D-Polarzüge Kranzberger Forst mit / ohne Zwischenkalibrierung und ohne Zugabgleich	119
Tabelle 6-18: Ergebnisse 3D-Polarzüge Kranzberger Forst mit Zugabgleich	119
Tabelle 6-19: Teilabschnitte Polarzug FORSTWEG ohne Zugabgleich	120
Tabelle 6-20: Teilabschnitte Polarzug FORSTWEG mit Zugabgleich	120
Tabelle 6-21: Innere Genauigkeit S und μ	120
Tabelle 6-22: Ergebnisse DGM-Genauigkeitsuntersuchungen Winterbefliegung	124
Tabelle 6-23: Merkmale der Testgebiete für die DGM gestützte 3D-Positionierung	124
Tabelle 6-24: Ergebnisse DGMMatch Basisberechnung	129
Tabelle 6-25: Rechenzeit Basisberechnung DGMMatch	130
Tabelle 6-26: Analyse der Ergebnisse Basisberechnung	130
Tabelle 6-27: Einfluss markanter Geländeformen auf die DGMMatch-Punktbestimmung	131
Tabelle 6-28: Ergebnisse AutoDGMMatch	137
Tabelle 6-29: Ergebnisse MultiDGMMatch	141
Tabelle 6-30: Ergebnisse DGMMatch V1.65	143
Tabelle 7-1: Messvarianten der GPS-Inventurpunktmessung NPV	156

Literaturverzeichnis

[ABWERZGER 2004]

G. Abwerzger: „*Integrating GNSS and Loran-C on raw-data level*“, Dissertation, Institute of Navigation and Satellite Geodesy, Graz University of Technology, 2004

[ACKERMANN 1999]

F. Ackermann: „*Airborne laser scanning – present status and future expectations*“, ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1999

[ACM SIGCHI 2004]

Association for Computing Machinery, Special Interest Group for Human Computer Interaction (SIGCHI)
<http://sigchi.org/>

[ADOBE 1992]

Adobe Systems Inc.: „*TIFF, Revision 6.0, Final, June 3- 1992*“, Technical Note, 1992

[ATTWENGER, BRIESE 2003]

M. Attwenger, C. Briese: „*Vergleich digitaler Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning*“, in Vermessung & Geoinformation, Österreichische Gesellschaft für Vermessung u. Geoinformation, Wien, 4/2003

[AXELRAD et al. 1994]

P. Axelrad, C. Comp, P. MacDoran: „*Use of Signal-to-Noise Ratio for Multipath Error Correction in GPS Differential Phase Measurements: Methodology and Experimental Results*“, Proceedings ION GPS-94, Salt Lake City, 2004

[BALBACH 2000]

O. Balbach: „*UMTS – Competing Navigation System and Supplemental Communication System to GNSS*“, in Proceedings to ION GPS Meeting 2000, Salt Lake City, Utah, Institute of Navigation, 2000

[BARTELME 2000]

N. Bartelme: „*Geoinformatik Modelle, Strukturen, Funktionen*“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000

[BAUER 1995]

W. Bauer: „*Konzeption und Genauigkeitsuntersuchungen von Koordinatentransformationen für das Informationssystem der Bay. Staatsforstverwaltung*“, Diplomarbeit am Fachgebiet Geoinformationssysteme, TU München, 1995

[BAUER 1997]

M. Bauer: „*Vermessung und Ortung von Satelliten*“, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 1997

[BAUMANN 1985]

E. Baumann: „*Vermessungskunde*“, Lehr- und Übungsbuch für Ingenieure, Band 2, F. Dümmler Verlag, 1985

[BENNING, AUSSEMS 1998]

W. Benning, T. Aussems: „*Mobile mapping – digitale Datenerfassung mittels CDSS und automatisierte Auswertung von Videosequenzen*“, Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 6, Konrad Witwer Verlag, Stuttgart, 1998

[BENNING et al. 2004]

W. Benning, R. Becker, C. Effkemann: „*Extraktion von Ecken, Kanten und Profilen aus Laserscannerdaten, gestützt durch photogrammetrische Aufnahmen*“, in Luhmann, Thomas (Hrsg.), „*Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik*“, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2004

[BIERMAYER et al. 1999]

G. Biermayer, A. Kley, H. Droste: „*Ziele und Konzept der Forsteinrichtung im Staatswald Bayern*“, AFZ/DerWald, Nr. 20, 1999

[BILL 1999]

R. Bill: „*Grundlagen der Geo-Informationssysteme*“, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 1999

[BILL et al. 2002]

R. Bill, R. Seuß, M. Schilcher: „*Kommunale Geoinformationssysteme*“, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[BILL, ZEHNER 2001]

R. Bill, M. Zehner: „*Lexikon der Geoinformatik*“, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001

[BMW 2006]

Head Up Displays 5er-Modellreihe: <http://www.bmw.de/de/produkte/automobiles/5er/limousine/index.html>

[BRANDSTÄTTER 1983]

G. Brandstätter: „*Vermessungskunde II*“, Vorlesungsskript, TU Wien, 1983

[BRENNER et al. 1998]

W. Brenner, R. Zarnekow, H. Wittig: „*Intelligente Softwareagenten*“; Springer Verlag, Heidelberg, 1998

[BROWN 2001]

G. Brown: „*Location Based Services: A balanced view*“; in GEOEurope, October, 2001

[BRÜNIG, MAYER 1980]

E. Brünic, H. Mayer: „*Fachwörter der forstlichen Produktion*“, IUFRO-Gruppe, Ökosysteme, Institut für Waldbau, Universität der Bodenkultur, Wien, 1980

[BRUNNER et al. 1999]

F.K. Brunner, H. Hartinger, L. Troyer: „*GPS signal diffraction modelling: stochastic SIGMA- Δ -model*“, Journal of Geodesy, Springer Verlag, 1999

[BRUNNER et al. 2000]

F.K. Brunner, H. Hartinger, A. Wieser: „*Zur kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken mit GPS*“, in G. Heigerth: „Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen“, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, TU Graz, 2000

[BUTSCH 2001]

F. Butsch: „*Untersuchungen zur elektromagnetischen Interferenz bei GPS*“, Dissertation, Schriftenreihe der Institute des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Universität Stuttgart, 2001

[BUTSCH, KIPKA 2004]

F. Butsch, A. Kipka: „*Die Bedeutung des Signal-Rauschleistungsverhältnisses und verwandter Parameter für die Messgenauigkeit bei GPS*“, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2/2004

[CARUSO et al. 1998]

M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith, R. Schneider: „*A New Perspective on Magnetic Field Sensing*“, Technical Article, <http://www.ssec.honeywell.com>, Honeywell Solid State Electronics Centre, USA, 1998

[CARUSO 1999]

M. J. Caruso: „*Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors*“, Technical Article, <http://www.ssec.honeywell.com>, Honeywell Solid State Electronics Centre, USA, 1999

[CANON 2004]

Eye-Tracking: http://www.canon.com/technology/detail/product_tech/eye_tracking/, 2004

[CGALIES 2002]

Final Report of the Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services (CGALIES), Initiative of the European Commission, DG INFSO, <http://www.telematica.de/cgalies/>, 2002

[CISCO 2003]

CISCO Systems Deutschland: „*Effizientere Arbeitsabläufe durch internetgestützte Informationstechnologie in freien Berufen und Unternehmen der Dienstleistungsbranche*“, www.cisco.com/global/DE/solutions/smb/branchenloesungen/pdf/dienstleistung.pdf, 2003

[CITROEN 2006]

Head Up Displays für C6-Modellreihe: <http://www.citroen-c6.de/index.cfm>

[COBB, O'CONNOR]

St. Cobb, M O'Connor: „*Pseudolites: Enhancing GPS with Ground-based Transmitters*“, in GPS World, 3/1998

[COLLINS, STEWART 2000]

J. P. Collins, P. J. Stewart: „*GPS SNR Observations*“, Memorandum, Geodetic Research Laboratory, Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, <http://gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/SNR.memo.pdf>, 2000

[CZAJA 1999]

J. Czaja: „*Grobkonzept zum Forschungsprojekt „Einsatz eines mobilen Multi-Sensor-GIS für waldökologische Aufgaben*“, interner Bericht, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 25.10.1999, unveröffentlicht

[CZAJA 2000]

J. Czaja: „*Marktanalyse für mobiler GIS*“, in Tagungsband zum 5. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 2000

[CZAJA 2001a]

J. Czaja: „*Mobile GIS in der Ingenieurpraxis*“, Tagungsband GISNet 2001, Bonn, IRR Deutschland GmbH, 2001

[CZAJA 2001b]

J. Czaja: „*Sensorgestütztes mobiles GIS - 1. Zwischenbericht HTO-Teilprojekt 33-2- ,1.September 2001*“, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2001, unveröffentlicht

[CZAJA, HAMBERGER 2001]

J. Czaja, J. Hamberger: „*Navigation und Einmessung mit DGPS im Wald*“, AFZ-DerWald, München, 25/2001

[CZAJA 2002]

J. Czaja: „*Was macht GIS mobil ?*“, Vortragsmanuskript, Workshop 2 „Mobile ortsbezogene Geo-Informationsdienste“, GISSIT 2002, ETH Zürich, 2002

[CZAJA 2002b]

J. Czaja: „*Sensorgestütztes mobiles GIS - 2. Zwischenbericht HTO-Teilprojekt 33-2- ,1.Märzr 2002*“, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2002, unveröffentlicht

[CZAJA 2003a]

J. Czaja: „*HTO-Teilprojekt 33-2 „Sensorgestütztes mobiles GIS, Abschlussbericht, 31.Oktober 2003*“, Lehrstuhl für Geodäsie, 2003

[CZAJA 2003b]

J. Czaja: „*Sensorgestütztes mobiles GIS - 3. Zwischenbericht HTO-Teilprojekt 33-2- ,1. März 2003*“, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2003, unveröffentlicht

[CZAJA 2003c]

J. Czaja: „*Positionierung mit Qualitätskontrolle beim Einsatz mobiler GIS im Nationalpark Bayerischer Wald*“, in Tagungsband zur POSNAV 2003, 18./19. März, Dresden, Deutsche Gesellschaft zur Ortung und Navigation, 2003

[CZAJA 2003d]

J. Czaja: „*Visualisierung von Dauerbeobachtungsflächen in ArcView 3.2 unter Berücksichtigung der Aspekte einer grafisch gestützten Felddatenerfassung mit ArcPad 6*“, Tourguide im Rahmen des HTO-Projektes 33-2, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2003

[CZAJA, HEURICH 2003]

J. Czaja, M. Heurich: „*GPS für Waldinventur im Nationalpark Bayerischer Wald*“, Österreichische Forstzeitung, Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf, 10/2003

[CZOMMER 2001]

R. Czommer: „*Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Technik*“, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, in DGK –Reihe C-, 2001

[CZOMMER, MÖHLENBRINK 1999]

R. Czommer, W. Möhlenbrink: „*Multi-Sensor Map Matching Concepts for Positioning of Road and Rail Vehicles*“, Proceedings of International Workshop on Mobile Mapping Technology, Bangkok 1999

[DAI et al. 2001]

L. Dai, J. Wang, C. Rizos, S. Han: „*Applications of Pseudolites in Deformation Monitoring Systems*“, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19 – 22 March, Orange, California, USA, 2001

[DEEP MAP 2004]

Projekt „Deep Map“, European Media Laboratory GmbH, Heidelberg, www.eml-development.de, 2004

[DE LANGE 2002]

N. de Lange: „*Geoinformatik in Theorie und Praxis*“, Springer Verlag, Berlin, 2002

[DENGLER et al. 2001]

F. Dengler, W. Henseler, H. Zimmermann: „*Mobile Informationssysteme – Hard- und Softwaregestaltung im sozialen Kontext*“, in Mensch & Computer 2001, 1. Fachübergreifende Konferenz, Stuttgart, B. G. Teubner Verlag, 2001

[DEUMLICH, STAIGER 2002]

F. Deumlich, R. Staiger: „*Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*“, 9. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[DGPS 2006]

Detailsinformationen DGPS u. a. www.sapos.de; www.wsv.de/fvt/, www.ascos.de, www.omnistar.com, 2006

[DIN EN 60529]

Ausgabe:2000-09, Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code) (IEC 60529:1989 + A1:1999); Deutsche Fassung EN 60529:1991 + A1:2000

[DONAUBAUER 2004]

A. Donaubaue: „*Interoperable Nutzung verteilter Geodatenbanken mittels standardisierter Geo Web Services*“, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München, Fachgebiet Geoinformationssystem, 2004

[DRESCHER 2005]

D. Drescher: „*Bungalowfinder – Entwicklung eines GPS-gestützten Fußgängernavigationssystems am Beispiel Olympiadorf München*“, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2005

[EICHINGER 2003]

A. Eichinger: „*Entwicklung einer web-fähigen Geodatenbank für geowissenschaftliche Zwecke*“, Diplomarbeit, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Fachgebiet Geoinformationssysteme, TU München, 2003

[ELLM, EL-SHEIMY 2001]

C. Ellum, N. El-Sheimy: „*A Mobile Mapping System for the Survey Community*“, in Proceedings zum 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, 3.-5. Januar, 2001

[ELLM, EL-SHEIMY 2002]

C. Ellum, N. El-Sheimy: „*Land-based integrated systems for mapping and GIS applications*“, in Survey Review, January 2002, Vol. 36, The Commonwealth Association of Surveying and Land Economy, 2002

[ENGELHARDT 1995]

G. Engelhardt, E. Rausch: „*German GPS Reference Network (DREF)*“, in den Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 56, Reports of the EUREF Technical Working Group, C.H. Beck Verlag, München, 1995

[ENGLS 2001]

F. Engls: „*Anforderungen an ein GPS-Gerät beim Einsatz im forstlichen Versuchswesen*“, AFZ-Der Wald, Deutscher Landwirtschaftsverlag, München, 10/2001

[ESA 2003]

European Space Agency, ARTEST 5 Project „*NAVIndoor 2*“, Final Report
http://esamultimedia.esa.int/docs/NavigationProjects/NAVIndoor2_FP.pdf

[ESA 2004a]

European Space Agency, http://www.esa.int/esaNA/ESAF530VMOC_index_1.html, 2004

[ESA 2005]

European Space Agency, http://esamultimedia.esa.int/docs/egnos/estb/egnos_pro.htm, 2005

[ESRI 1998]

ESRI White Paper: „*ESRI Shapefile Technical Description*“, ESRI Inc., Redlands, USA, 1998

[ESRI 2004]

ESRI ArcGIS 8.3 Documentation: „*Building a Geodatabase*“, ESRI Inc., Redlands, USA, 1998

[EVANS et al. 2003]

A.J. Evans, G. W. Roberts, A.H. Dodson, S. Cooper, R. Hollands, B. Denby, M. Turner, D. Owen: „*Applications of Augmented Reality: Utility Companies*“, in Survey Review, July 2003, Vol. 37, No. 289, The Commonwealth Association of Surveying and Land Economy, 2003

[FCC E911 2004]

U. S. Federal Communications Commission, <http://www.fcc.gov/911/enhanced/>, 2004

[FER 1982]

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten: „*Richtlinie für die mittel- und langfristige Forstbetriebsplanung (FER 1982)*“, 1982

[FERIC 1997]

Forest Engineering Research Institute of Canada: „*A comparison of seven GPS units under forest conditions*“, Special Report No. SR-120, FERIC, 1997

[FISCHER, KNÖRZER 2003]

F. Fischer, O. Knörzer: „*Statistische Analyse von digitalen Geländemodellen und Waldstrukturen im Nationalpark Bayerischer Wald mit Hilfe von hochaufgelösten Laserscanningdaten und GPS-Messungen*“, Diplomarbeit im Fachbereich Vermessung und Kartographie, Fachhochschule München, 2003

[FSC 2004]

Produkt Pocket Loox, Fujitsu-Siemens Computers, <http://www.fujitsu-siemens.de>, 2004

[GARMIN 1998]

Garmin International Inc, FAQ Beitrag in <http://gpsinformation.net/main/epenew.txt>, 1998

[GEODATA 2004]

Produktdatenblatt „CityScanner“, Fa. GEODATA, Leoben (A), 2004

[GIANNIOU 1996]

M. Gianniou: „Genauigkeitssteigerung bei kurzzeit-statischen und kinematischen Satellitenmessungen bis hin zu Echtzeitanwendungen“, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 458, 1996

[GOAD 1988]

C. C. Goad: „Investigation of an alternate method of processing Global Positioning survey data collected in kinematic mode“, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 1988

[GRAUL 2002]

C. Graul: „Location Based Services – Motor mobiler Kommunikation?“, in „Geoinformation mobil“, Zipf/Strobl (Hrsg.), H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[GRÜNVOGEL, HEURICH 2002]

H. Grünvogel, M. Heurich: „Anweisung zur Waldinventur 2002“, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Berichte aus dem Nationalpark, Heft 2, 2002

[GRUEN, AKCA 2005]

A. Gruen, D. Akca: „Least squares 3D software and curve matching“, ISPRS, Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2005

[GUGER et al. 2004]

C. Guger, D. Ortner, D. Weisskopf: „Software Agenten: Grundlagen und Überblick“, Seminararbeit SS 2000, Institut für Wirtschaftsinformatik, Johannes Kepler Universität, Linz, 2000

[GURTNER 1994]

H. Gurtner: „The Receiver-Independent Exchange Format“, GPS World, July, 1994

[HAKE et al. 2002]

G. Hake, D. Grünreich, L. Meng: „Kartographie: Visualisierung raum-zeitlicher Informationen“, Verlag Walter de Gruyter, 2002

[HAMBERGER 1999]

J. Hamberger: „Ist GPS geeignet um Befahrungen schwerer Holzernemaschinen auf Rückegassen zu dokumentieren?“, Forsttechnische Informationen (FTI) 5+6, Groß-Umstadt, 1999

[HAMBERGER, CZAJA, BOLLIN 2001]

J. Hamberger, J. Czaja, N. Bollin: „GPS als Navigationsmittel bei der zweiten Bundeswaldinventur (BWI II)“, Abschlussbericht zum Projekt ST-93 des Bayer. Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten, München, 2001

[HAMBERGER 2002]

J. Hamberger: „GPS als Mittel zum umweltschonenden Maschineneinsatz: Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen“, Forstliche Forschungsberichte Nr. 188, WZW, TU München, 2002

[HAMBERGER, MÖßMER 2002]

J. Hamberger, R. Mößmer: „Programm für das Auffinden und Einmessen von Stichprobenpunkten“, AFZ-Der Wald, Deutscher Landwirtschaftsverlag, München, 13/2002

[HARTINGER et al. 1999]

H. Hartinger, E. Grillmayer, F.K. Brunner: „Über die Schranken hochgenauer GPS Vermessungen“, in Vermessung und Raumordnung, Nr. 61, Dümmler Verlag, Bonn, 1999

[HARTINGER, BRUNNER 1999]

H. Hartinger, F.K. Brunner: „Variances of GPS Phase Observations: The SIGMA- ϵ -Model“, GPS Solutions, Vol.2, No. 4, John Wiley & Sons, 1999

[HELM 1998]

F. Helm: „Strenge Geometrisierung und Rektifizierung manueller Skizzen für geodätische Aufnahmeprozesse“, Dissertation am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien, 1998

[HEURICH 2002]

M. Heurich: „Entwicklung innovativer Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen“, Projektpräsentation des HTO-Teilprojektes 33-8, Statusseminar 25.10.2002, Neuschönau, unveröffentlicht

[HEURICH et al. 2003]

M. Heurich, T. Schneider, E. Kennel: „*Laser scanning for identification of forest structures in the Bavarian Forest National Park*“, in Hyypä J., Naesset E., Olsson H., Grandqvist P. and H. Reese (Editors): Proceedings of the ScandLaser Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, 2-4. September, Umea, Schweden, 2003

[HOFMANN-WELLENHOF et al. 2003]

B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, A. Wieser: „*Navigation –Principles of Positioning and Guidance*“, Springer Verlag, Wien/New York, 2003

[HOSSE 2005]

K. Hosse: „*Objektorientierte Modellierung und Implementierung eines temporalen Geoinformationssystems für kulturelles Erbe*“, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München, Fachgebiet Geoinformationssystem, 2005

[HUBER 2002]

U. Huber: „*Das Referenz-Geoinformationssystem „Nationalpark Bayerischer Wald“, eine fachübergreifende Forschungsplattform für die Geoinformatik*“, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München, Fachgebiet Geoinformationssystem, 2002

[HUNTER 2004]

A. Hunter: „*Mobile GIS and Speech Recognition*“, Mobile Multi-Sensor Systems Research Team, University of Calgary, <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/MMSensor/resources/themepages/>, 2004

[IAG 2004]

International Association of Geodesy, Commission 4, Sub-Commission 4.1: „*Multi-Sensor Systems*“
www.ceegs.ohio-state.edu/IAG-SC41, 2004

[ILLNER 1995]

M. Illner: „*GPS-Systembeschreibung*“, in DVW-Schriftenreihe 18/1995 „GPS-Leistungsbilanz'94“, Konrad Witwer Verlag, Stuttgart, 1995

[INGENSAND 2000]

H. Ingensand: „*Einführung in die Technologien und Anwendungsszenarien des Mobile Computing*“, in Tagungsband zum 5. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 2000

[INGENSAND, BITZI 2001]

H. Ingensand, P. Bitzi: „*Technologien der GSM-Positionierungsverfahren*“, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 8-9, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2001

[INGENSAND 2002]

H. Ingensand: „*Einführung in die Technologien und Applikationen mobiler Informationssysteme*“, Skript zum Modul 2C: Grundlagen und Einsatz von GPS in der Praxis und mobile Informationssysteme, ETH Zürich, 2002

[ITRONIX 2004]

Produkt Gobook, Itronix GmbH, <http://de.itronix-europe.com/>, 2004

[JEHL 1995]

H. Jehl: „*Die Waldentwicklung auf Windwurfflächen im Nationalpark Bayerischer Wald*“, in „Nationalpark Bayerischer Wald – 25 Jahre auf dem Weg zum Naturwald“, Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald (Hrsg.), 1995

[JOECKEL, STOBER 1995]

R. Joeckel, M. Stober: „*Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*“, 3. erweiterte Auflage, Verlag Konrad Witwer, Stuttgart, 1995

[JORDAN et al. 1956]

Jordan, Eggert, Kneissl: „*Handbuch der Vermessungskunde*“, 10. Ausgabe, Band III, J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1956

[KAPLAN 1996]

E. Kaplan: „*Understanding GPS –Principles and Applications*“, Lehrbuch, Artech House Inc., London, 1996

[KELLERER 2002]

W. Kellerer: „*Die Zukunftsvision von DoCoMo Eurolabs für die nächste Mobilfunk Generation*“, in Tagungsband zum 7. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 2002

[KENNEL 2001]

E. Kennel: „*Entwicklung innovativer Methoden zur Erfassung von Waldstrukturen*“, Projektantrag im Rahmen des HTO-Verbundprojektes 33 „Forschung über Waldökosysteme“, Department für Ökosystem- und Landschaftsmanagement, Fachgebiet für Forsteinrichtung, TU München, unveröffentlicht, 2001

[KLEINN 1993]

C. Kleinn: „*GPS als Hilfsmittel für Forstinventuren?*“, AFZ-Der Wald, München, 14/1993

[KLEUSBERG, TEUNISSEN 1996]

A. Kleusberg, P. Teunissen (Eds.): „*GPS for Geodesy*“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996

[KLEY, THANBICHLER 1999]

A. Kley, G. Thanbichler: „*Datenverarbeitung in der Forsteinrichtung*“, AFZ/DerWald, Heft 20, 1999

[KÖGLMEIER 2001]

M. Köglmeier: „*Vergleich der Softwarepakete ArcPad und GISPAD für mobile GIS am Beispiel der Waldinventur im „Nationalpark Bayerischer Wald“*“, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München, 2000

[KÖLMEL, WIRSING 2002]

B. Kölmel, M. Wirsing: „*Nutzererwartungen an Location Based Services – Ergebnisse einer empirischen Analyse*“, in „*Geoinformation mobil*“, Zipf/Strobl (Hrsg.), H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[KRAMER 1980]

H. Kramer: „*Begriffe der Forsteinrichtung*“, 2. Auflage, D. Sauerländer´s Verlag, 1980

[KRAUS 2004]

K. Kraus: „*Photogrammetrie – Band 1*“, 7. Auflage, Verlag Walter de Gruyter, Berlin/New York, 2004

[KREUTTER 1995]

J. Kreutter: „*Aufmessung von Waldwegen mit GPS*“, AFZ-Der Wald, Deutscher Landwirtschaftsverlag, München, 22/1995

[KÜHL 1999]

R. Kühl: „*GIS-Daten im Feldeinsatz -30% Kostensenkung mit neuen Technologien*“, in „*Der Vermessungsingenieur*“, Verband Deutscher Vermessungsingenieure e. V., Verlag Chmielorz, Wiesbaden, 4/1999

[LADETTO, MERMINOD 2002]

Q. Ladetto, B. Merminod: „*In Step with INS*“, in GPS World, October 2002, Advanstar Communications Inc., 2002

[LADSTÄTTER 2002]

P. Ladstätter: „*Ein Standpunkt kann bares Geld wert sein – LBS in der Unternehmenspraxis*“, in „*Geoinformation mobil*“, Zipf/Strobl (Hrsg.), H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[LANGLEY 2003]

R. B. Langley: „*The Magnetic Compass and GPS*“, in GPS World Magazin, 9/2003

[LEICA GEOSYSTEMS 2003]

Produktinformation „*Leica Vector*“, Leica Geosystems, Heerbrugg, Schweiz, www.leica-geosystems.com, 2003

[LEICK 2004]

A. Leick: „*GPS Satellite Surveying*“, 3rd edition, Wiley & Sons, 2004

[LELGEMANN 1999]

D. Lelgemann: „*Zur Bedeutung relativer Höhenanomalien zur Koordinatentransformation von DHDN in ETRS89*“, Zeitschrift für Vermessungswesen, Jahrgang 124, Heft 5, 1999

[LOTHER 2003]

G. Lothar: „*Konzeptionelle Aspekte eines landesweiten Fachgeoinformationssystems für die Bestandsdokumentation forstlicher Geodaten*“, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- u. Vermessungswesen der TU München, 2003

[LTI 2003]

Produktinformationen „*Impulse, MapStar Compass Module, MapStar Angel Encoder*“, Laser Technology Inc., Centennial, USA, www.lasertech.com, 2003

[LÜTHI, ZGRAGGEN 1996]

J. Lüthi, P. Zraggen: „*Einsatz eines digitalen Messtisches in der geodätischen Feldaufnahme*“, CAF 2000 Tagung, Fachhochschule beider Basel, Muttenz, 1996

[LUHMANN 2004]

T. Luhmann (Hrsg.): „*Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*“, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2004

[**M**AAS 2005]

H.-G. Maas: „*Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning*“, in Kartographische Nachrichten, 01/2005, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005

[MANN 1998]

S. Mann: „*Wearable computing as means of personal empowerment*“, Keynote address at International Conference on Wearable Computing, Fairfax VA, 1998

[MANSFELD 1998]

W. Mansfeld: „*Satellitenortung und Navigation*“, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1998

[MATHWORKS 2005]

Fa. Mathworks: *Produktbeschreibung Matlab*, <http://www.mathworks.de/products/matlab/description1.html>, 2005

[MDL 2001]

„*LaserAce 300 – The Personal Laser Surveying System*“, Operation Manual, Measurement Devices Ltd., UK, 2001

[MENG et. al. 2005]

L. Meng, T. Reichenbacher, A. Zipf (Editors): „*Map-based Mobile Services*“, Springer Verlag, Berlin, 2005

[MERMINOD et al. 1990]

B. Merminod, D. B. Grant, C. Rizos: „*Planning GPS surveys – using appropriate precision indicators*“, CISM Journal ACSGC, Vol. 44, No.3, 1990

[MERMINOD, RIZOS 1994]

B. Merminod, C. Rizos: „*Optimisation of rapid static GPS surveys*“, Manuscripta Geodetica, Springer Verlag, 1994

[METTENMEIER 2004].

Produkt colibri, Mettenmeier Unternehmensgruppe, <http://www.fge.de/mettenmeier/mettenmeier.htm>, 2004

[MIL-STD 2004].

Militärischer Standard des U.S. Verteidigungsministeriums, <http://dodssp.daps.dla.mil/>, 2004

[MÖSER et al. 2000]

M. Möser, G. Müller, H. Schlemmer, H. Werner (Hrsg.): „*Handbuch Ingenieurgeodäsie*“, 3. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000

[MÖßMER et al. 2002]

R. Mößmer, J. Hamberger, G. Waas: „*GPS im Dauertest in Bayern*“, AFZ-DerWald, München, 2002

[MOPTIC 2006]

The MicroOptical Corporation, Westwood, MA, USA, <http://www.microopticalcorp.com/>, 2006

[MOSES 2003]

Mobiles Strassenerfassungssystem „*Kinematische Vermessung von Verkehrsanlagen*“, in interAktiv, CARD/1 Anwendermagazin, Ausgabe 2/2003, IB&T GmbH, Hamburg, 2003

[**N**AGEL 2000]

G. Nagel: „*Zukunftsperspektiven der Katastervermessung*“, Mitteilungsblatt DVW Bayern e. V., München, 2000

[NEXUS 2005]

Projekt NEXUS, Sonderforschungsbereich 1958, Teilprojekt C1 „*Sensorik und Bildverarbeitung*“, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/forschung/nexus/tpc1.html>, 2005

[NIEMEIER 1994]

J. Niemeier: „*Mobile Computing: Informationstechnologie ortsungebunden nutzen; Techniken, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*“, Computerwoche-Verlag, München, 1994

[NONNENMÜHLEN 2001]

M. Nonnenmühlen: „*Digitaler Datenaustausch zwischen mobilem GIS und dem Referenz-GIS „Nationalpark Bayerischer Wald“ am Beispiel der Waldinventur*“, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geodäsie der TU München, unveröffentlicht, 2001

[NMEA 2006]

National Marine Electronics Association, Publications and Standards, <http://www.nmea.org/pub/index.html>, 2006

[NÜßLEIN et al. 1999]

S. Nüßlein, M. Stockmeyer: „*Praxisbeispiele zur Visualisierung dreidimensionaler zeitlicher Phänomene*“, in Tagungsband zum 4. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 1999

[OGC 2005]

Open Geospatial Consortium Inc., <http://www.opengeospatial.org>, 2005

[ORBIT 2004]

Institut für wissenschaftliches Rechnen, ETH Zürich, <http://www.orbit.ethz.ch/>, 2004

[PANASONIC 2004]

Produkt CF-P1, Panasonic Deutschland GmbH, <http://www.produkte.panasonic.de>, 2004

[PARKINSON, SPILKER 1996]

B. W. Parkinson, J. J. Spilker: „*Global Positioning System: Theory and Applications Volume I + II*“, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Washington DC, USA, 1996

[PELZER 1980]

H. Pelzer (Hrsg.): „*Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung*“, Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1979 in Hannover, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart, 1980

[PEUQUET 2002]

D. J. Pequet, „*Representations of Space and Time*“, The Guilford Press, New York, 2002

[PFEIFER 2003]

N. Pfeifer: „*Oberflächenmodelle aus Laserdaten*“, in *Vermessung & Geoinformation*, Österreichische Gesellschaft für Vermessung u. Geoinformation, Wien, 4/2003

[PREIS 2005]

S. Preis: „*Prototypische Entwicklung eines Wireless Assisted GPS mit einem Niedrigpreis-Empfänger*“, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2005

[RANZINGER 2002]

M. Ranzinger: „*Einsatz mobiler GIS bei Energieversorgungsunternehmen in den Bereichen Instandhaltung und Störungsmanagement*“, in „*Geoinformation mobil*“, Zipf/Strobl (Hrsg.), H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[RESNIK 2001]

B. Resnik: „*Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen Geodatenerfassung mit Freihandmesssystemen*“, *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 7/2001, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2001

[RETSCHER, MOK 2001]

G. Retscher, E. Mok: „*Integration of mobile phone location services into intelligent GPS vehicle navigation systems*“, in *Proceedings to 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Cairo, 3.-5. Januar, 2001

[RICHTER 1999]

B. Richter: „*Konfigurationsabhängige Genauigkeitsfaktoren für GPS-Basislinien*“, Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Geophysik, Technische Universität Wien, 1999

[RICHTER, ZIEGLER 2001]

B. Richter, Ch. Ziegler: „*Study of Improved Observation Modeling for Surveying Type Applications in Multipath Environment*“, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2001

[ROBERTS 2002]

G. Roberts, A. Evans, A. Dodson, B. Denby, S. Cooper, R. Holland: „*Look Beneath the Surface with Augmented Reality*“, *GPS World*, February 2002, Advanstar Communications Inc., 2002

[ROSCHLAUB, SCHILCHER 1995]

R. Roschlaub, M. Schilcher: „*Forschung an Hochschulen am Beispiel mobiler GIS-Systeme*“, Vortragsunterlagen zum 4. Int. Anwenderforum 1995, Universität Duisburg, 22.-23. Feb. Fachgebiet Geoinformationssysteme, TU München, 1995, unveröffentlicht

[ROTH 2002]

J. Roth: „*Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte*“, dpunkt-Verlag, Heidelberg, 2002

[ROTHACHER et al. 2000]

M. Rothacher, A. Bauch, R. Rummel: „*Tutorial 1: Bezugssysteme in Lage und Höhe*“, Unterlagen zum Tutorial 1 im Rahmen des XIII. International Course on Engineering Surveying, TU München, 2000

[RTCM 2004]

Radio Technical Commission for Maritime Services: „*RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service*“, Version 3.0, RTCM Paper 30-2004/SC104-STD.

[RÜEGER 1996]

J. M. Rüeger: „*Electronic Distance Measurement*“, 4th edition, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1996

[RÜFFER, HEMMERT 2005]

J. Ruffert, J. Hemmert: „Galileo meets Geodesy“, in „Der Vermessungsingenieur“, Verband Deutscher Vermessungsingenieure, Verlag Chmielorz GmbH, Wiesbaden, 2004

[RUMMEL 2000]

R. Rummel: „Gebrauchshöhen und GPS“, Tutorial 1: Bezugssysteme in Lage und Höhe - Teil C, Ingenieurvermessung 2000, 13. – 17. März 2000, TU München, 2000

[RUMMEL 2005]

R. Rummel: „Landesvermessung“, vorläufiges Vorlesungsskript, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München, 2005

[SCHÄFER 2003]

T. Schäfer: „Anwendung eines Indoor-LPS zur Bestimmung und Analyse von Einkaufswagentrajektorien“, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 2003, unveröffentlicht

[SCHERER 2005]

M. Scherer: „Visualisierung und simultane Erfassung der Geometrie mit Tachymeter und Digitalkamera – Eine Alternative zum Laserscannen in der Bauaufnahme“, in „Flächenmanagement und Bodenordnung“, Heft 6, Luchterhand-Verlag, Neuwied, 2005

[SCHERRER 1987]

R. Scherrer: „The WM GPS Primer“, Wild Heerbrugg Ltd., Switzerland, 1987

[SCHEUGENPFLUG 2003]

S. Scheugenpflug: „Aufbau eines Geodatenservers für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen -3 Zwischenbericht HTO-Teilprojekt 33-1-, 1. März 2003“, Fachgebiet Geoinformationssysteme, TU München, 2003, unveröffentlicht

[SCHEUGENPFLUG 2004]

S. Scheugenpflug: „Aufbau eines Geodatenservers für forstwirtschaftliche und touristische Anwendungen - Abschlussbericht HTO-Teilprojekt 33-1-, 31. Dezember 2004“, Fachgebiet Geoinformationssysteme, TU München, 2004, unveröffentlicht

[SCHEUGENPFLUG 2005]

S. Scheugenpflug: „Relationale und Objektrelationale Datenbankkonzepte in Geoinformationssystemen“, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München, Fachgebiet Geoinformationssystem, 2005

[SCHILCHER 2003]

M. Schilcher, „Geoinformatik I - 3. Geodaten-“, Vorlesungsskript, Fachgebiet Geoinformationssysteme TU München, 2003

[SCHILCHER et al. 2002]

M. Schilcher, W. Haller, P. Ladstätter, S. Plabst: „Location Based Services (LBS) und Geoinformationssysteme – Kosten-/Nutzenanalyse für mobile Anwendungen“, in „Geoinformation mobil“, Zipf/Strobl (Hrsg.), H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[SCHILCHER, FRITSCH 1989]

M. Schilcher/D. Fritsch (Hrsg.): „Geo-Informationssysteme Anwendungen – neue Entwicklungen“, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1989

[SCHLEMMER 1998]

H. Schlemmer: „Hybride Vermessungssysteme – ein Überblick“, in DVW-Schriftenreihe, Band 29, Konrad Witwer Verlag, Stuttgart, 1998

[SCHLUCHTER 1998]

A. Schluchter: „Entwicklung und Erprobung eines Systems zur objektbezogenen tachymetrischen Datenerfassung mittels Telemetry“, in DGK-Schriftenreihe, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 498, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 1998

[SCHMITT, MÖST 2002]

K. Schmitt, K. Möst: „Topographische Geländeaufnahme heute“, Mitteilungen 3/2002, Deutscher Verein für Vermessungswesen Bayern e. V., München, 2002

[SCHNÄDELBACH 1996]

K. Schnädelbach: „Materialien zur Vermessungskunde I / 2“, Skript Wintersemester 1996/97, Geodätisches Institut, Technische Universität München, 1996

[SCHNÄDELBACH 1997]

K. Schnädelbach: „*Materialien zur Landesvermessung*“, Skript Wintersemester 1997/98, Geodätisches Institut, Technische Universität München, 1997

[SCHNÄDELBACH 1998]

K. Schnädelbach: „*Geodätische Bezugssysteme*“, in Tagungsband Fortbildung Geoinformationssysteme, TU München und DVW Bayern, München, 25.–28.3.1998

[SCHWENDT 1994]

P. Schwendt: „*Rationalisierung der Forstvermessung durch GPS*“, Österreichische Forstzeitung, 10/1994

[SCOUT 2004]

„*Satelliten- und Loran-C gestützte Ortung von mobilen User Terminals*“, Abschlussbericht, Telematica e. K., 2004

[SIRF 2005]

Product information „*SiRFstarIII GPS Single chip*“, SiRF Technology Inc. San Jose, USA, [http://www.sirf.com/Downloads/Collateral/GSC3\(f\)_6.20.05.pdf](http://www.sirf.com/Downloads/Collateral/GSC3(f)_6.20.05.pdf), 2005

[SMITH et al. 2001]

J. Smith, A. Kealy, I. Williamson: „*Location Based Services – the underlying technology*“, in Proceedings zum 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, 3.-5. Januar, 2001

[STANSELL, MAENPA 1999]

T. Stansell, J. Maenpa: „*ClerTrak™ GPS Receiver Technology*“, Bulletin Leica GPS, Torrance, USA, 1999

[STEMPFHUBER 2004]

W. Stempfhuber: „*Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen*“, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 576, 2004

[STEMPFHUBER, WUNDERLICH 2004]

W. Stempfhuber, T. Wunderlich: „*Leica System 1200: Auf dem Weg zur Sensorsynchronisation von GPS und TPS für kinematische Messaufgaben*“, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Wichmann Verlag, Heidelberg, 5/2004

[STEWART 2003]

M. P. Stewart: „*Multipath Mitigation*“, Mid-Term Report of Special Study Group 1.182 der International Association of Geodesy, Travaux 2003, <http://www.gfy.ku.dk/~iag/Travaux/html/sec1/SSG1.182.htm>, 2003

[StMLF 2004]

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, „*HTO-33-2, Projektabschluss*“, Schreiben vom 06.04.2004

[StMLF 2005]

BayStMLF Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Glossar forstlicher Fachbegriffe <http://www.forst.bayern.de/service/glossar/>, 2005

[TAO, EL SHEIMY 2000]

V. Tao, N. El-Sheimy: „*Highway Mobile Mapping*“, in GIM International, 10/2000, Geomatics Information & Trading Center bv (GITC), Lemmer (NL), 2000

[TOPOSYS 2005]

TopoSys GmbH: „*TopoSys Corridor Mapping*“, White Paper, Rev.1, 09. Nov. 2005, Biberach, 2005

[TORGE 1991]

W. Torge: „*Geodesy*“, 2nd Edition, Walter de Gruyter Verlag, Berlin 1991

[VECTOR 2006]

Product information „*GPS Plus*“, Vectronic-Aerospace, <http://www.vectronic-aerospace.de/>, 1/2006

[VOLQUARDTS, MATTHEWS 1981]

H. Volquardts, K. Matthews: „*Vermessungskunde 2*“, 14. überarb. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 1981

[WAGNER et al. 2003]

W. Wagner, A. Ullrich, C. Briese: „*Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche*“, in Vermessung & Geoinformation, Österreichische Gesellschaft für Vermessung u. Geoinformation, Wien, 4/2003

[WALKER 2001]

G. Walker: „*Outdoor Color LCDs*“, Pen Computing Magazine, September issue, 2001

[WANNINGER 2000]

L. Wanninger: „*Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationen*“, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 508, 2000

[WEISS 2000]

J. Weiss: „*Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten satellitengestützter Navigationssysteme zur Messung von Strecken und Geschwindigkeiten*“, Diplomarbeit, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München, 2000

[WEISS, SCHRÖTER 2001]

M. Weiss, W. Schröter (Hrsg.): „*arbeit 21 – online mobil, MAP – Multimedia-Arbeitsplatz der Zukunft*“, Publikation im Rahmen des Leitprojektes MAP-Multimedia Arbeitsplatz der Zukunft, Darmstadt, September 2001

[WIESER 2002]

A. Wieser: „*Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS*“, Dissertation, Schriftenreihe Ingenieurgeodäsie – TU Graz, Shaker Verlag, Aachen, 2002

[WIESER, HARTINGER 2006]

A. Wieser, H. Hartinger: „*High-Sensitivity GPS: Technologie und Anwendungen*“, in 66. DVW-Seminar „GPS und GALILEO – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen“, 21/22.2.2006, Darmstadt, Schriftenreihe DVW, Band 49, Wißner Verlag.

[WILTSCSKO 1999]

T. Wiltschko: „*„Mobile Computing“ – Wege zur effizienten Datenverwaltung im Feld*“, in DVW-Mitteilungen, Landesverband Bayern, Heft 2, 1999

[WITTKE 1971]

H. Wittke: „*Einführung in die Vermessungstechnik*“, 14. überarb. Auflage, F. Dümmler Verlag, Bonn, 1971

[WRIGHT 2004]

B. Wright: „*Fighting Forest Fires with Technology*“, <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/MMSensor/index2.html> und <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/MMSensor/team/graduate/bruce/project.php>, 2004

[WÜBBENA et al. 2000]

G. Wübbena, A. Bagege, M. Schmitz: „*Referenzstationsnetze und internationale Standards*“, Tagungsband zum 3. SAPOS-Symposiums, Bayerisches Landesvermessungsamt, 23.-24. Mai, München, 2000

[WUNDERLICH 1993]

T. Wunderlich: „*Die gefährlichen Örtter der Pseudostreckenortung*“, Habilitationsschrift, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 190, 1993

[WUNDERLICH, CZAJA 2000]

T. Wunderlich, J. Czaja: „*Projektantrag zum HTO-Projekt „Sensorgestütztes mobiles GIS*“, Antrag zum HTO-Forschungsprojekt, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, 16. Oktober 2000

[WUNDERLICH 2000]

T. Wunderlich: „*Einsatz mobiler GIS in der Ingenieurpraxis – Trends und Perspektiven*“, in Tagungsband zum 5. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 2000

[WUNDERLICH 2001]

T. Wunderlich: „*Ortsbezogene Informationen – Jederzeit und überall ?*“, in Tagungsband zum 6. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, TU München, März 2001

[WUNDERLICH 2002]

T. Wunderlich: „*Vektorielle Abtastung mit Laser-Scannern*“, in „Beton- und Stahlbau 97“, Heft 11, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2002

[WUNDERLICH 2003]

T. Wunderlich: „*Geolokalisation – eine Position kennt ihre Umgebung*“, in Chesi/Weinold (Hrsg.), 12. Internationalen Geodätische Woche Obergurgel 2003, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2003

[WUNDERLICH 2006]

T. Wunderlich, Foliensammlung zur Vertiefungsvorlesung „*Geolokalisation und Fahrzeugnavigation*“, Lehrstuhl für Geodäsie, TU München, Wintersemester 2005/2006

[WUNDERLICH et al. 2006]

T. Wunderlich, S. Preis, Chengling Su: „*Wireless Assisted GPS – technische Möglichkeiten und notwendige Infrastruktur*“, in 66. DVW-Seminar „GPS und GALILEO – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen“, 21. – 22.2.2006, Darmstadt, Schriftenreihe DVW, Band 49, Wißner Verlag.

[ZAPF 2002]

R. Zapf: „Raumnutzung von Rotwild im Nationalpark Bayerischer Wald auf Basis konventioneller und satellitengestützter Telemetrie zwischen 1980 und 2001“, Diplomarbeit, Fachbereich Wald und Forstwirtschaft, Fachhochschule Weihenstephan, 2002

[ZIPF, STROBL 2002]

A. Zipf, J. Strobl: „Geoinformation mobil“, H. Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002

[ZIVADINOVIC 2005]

D. Zivadinovic: „Schöne neue Funk-Welt“, c't –Magazin für Computertechnik, 2/2005, Heise Verlag, 2005

[ZEBHAUSER 2000]

B. Zebhauser: „Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode“, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 523, 2000

[ZF 2005]

Lasermesssystem „IMAGER 5003“, Zoller + Fröhlich, Wangen. i. Allgäu, h www.zf-laser.com, 2005

[ZUENDT et al. 2004]

M. Zündt, P. Dornbusch, T. Schäfer, P. Jacobi, D. Flade: „Integration of Indoor Positioning into a Global Location Platform“, 1st Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2004, Shaker Verlag, Hannover, 2004

Dank

Mein herzlicher Dank geht an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich vom Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München, der nicht nur die notwendigen beruflichen Rahmenbedingungen für diese Arbeit schuf, sondern auch stets mit zahlreichen Anregungen und einem hohen Maß an Geduld wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Schlemmer vom Geodätischen Institut der Technischen Universität Darmstadt danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats und vor allem für die hilfreichen Diskussionen, die zur Idee des DGMMatch-Verfahrens führten.

Um das Forschungsprojekt „Sensorgestütztes mobiles GIS“ durchführen zu können, waren nicht nur gute Ideen, viel Motivation und großes Durchhaltevermögen, sondern auch finanzielle Unterstützung notwendig. Es sei deshalb an dieser Stelle der Bayerische Staatsregierung respektive der Regierung von Niederbayern für die Bereitstellung der Fördermittel im Rahmen der High-Tech-Offensive Bayern gedankt. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Staatsminister Erwin Huber, dem Herrn Präsidenten der TU München Prof. Wolfgang A. Hermann sowie dem Leiter der Bayerischen Vermessungsverwaltung Herrn Ministerialdirigent Prof. Josef Frankenberger für Ihre Unterstützung bei der Projektrealisierung.

Bei den Mitarbeitern am Lehrstuhl für Geodäsie und am Fachgebiet Geoinformationssysteme möchte ich mich für die gute Arbeitsatmosphäre und für die vielen kleinen und großen Hilfestellungen während und nach meiner Tätigkeit am Institut bedanken. Mein besonderer Dank geht hier an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthäus Schilcher für sein Engagement bei der Aquisition und Realisierung des HTO-Projektes, das die Ausgangsbasis für diese Arbeit darstellt, sowie an Dipl.-Ing. Peter Wasmeier für seine Unterstützung bei der Lösung von Matlab-Problemstellungen.

Den Mitarbeitern der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald danke ich für die stets hilfsbereite, konstruktive und teils freundschaftliche Zusammenarbeit im Rahmen des HTO-Forschungsprojektes und für die Bereitstellung der Testdaten für das hochgenaue digitale Geländemodell. So mancher „naturnaher“ Arbeitstag wird immer in Erinnerung bleiben.

Darüber hinaus möchte ich allen Freunden und Verwandten danken, die mich immer wieder aufs neue ermuntert und mich oder meine junge Familie unterstützt haben, die viel zu lange, viel zu häufig zurückstehen mußte. Mein größter Dank geht daher an meine Frau Silke sowie meine beiden Kinder Nils und Stina. Ohne eure unglaubliche Kraft, Liebe und Verständnis gebe es diese Arbeit nicht!

Curriculum Vitae

Allgemeine Angaben:

Name: Jens Czaja

Geburtsdatum: 22.08.1969

Geburtsort: Karlsruhe

Ausbildung und beruflicher Werdegang:

- 1982 – 1989 Allgemeine Hochschulreife
Ricarda-Huch Gymnasium, Dreieich-Sprendlingen
- 1989 – 1990 Grundwehrdienst
- 1990 – 1995 Studium des Vermessungswesens an der
Technischen Hochschule Darmstadt
- 1995 – 2001 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Geodäsie der
Technischen Universität München
- 2001 – 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geodäsie der
Technischen Universität München
- 2004 – 2006 Projekt- und Systemingenieur, Telematica e.K.
und
Senior Researcher, alpS – Zentrum für Naturgefahren Management, Innsbruck
- seit 7/2006 Projektmanager, Eureka Navigation Solutions AG, München-Oberpfaffenhofen

Anhang A: Produktvergleiche mobile Rechner/Applikationssoftware

Mobile Rechner Sommer 2001:

Produkte	Vorteil	+/-	Nachteil
PDA/Handheld PC/Pocket PC			
Compaq ipaq	<ul style="list-style-type: none"> - klein, leicht, preiswert - sehr gutes LCD - gutes Zubehörangebot 	<ul style="list-style-type: none"> - Energieversorgung (keine austauschbaren Akkus) - WinCE (Zukunft ?) - CPU (206 MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> - kleines Display - SRAM < 32 MB - nicht feldtauglich (Wasser, Stöße, Schnittstellenverbindungen)
PenTablet/Handheld PC Pro			
SunscreenPC	<ul style="list-style-type: none"> - Feldtauglichkeit - Display (800x600) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechenleistung (266 MHz) - SRAM 64 MB 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Upgrade Möglichkeiten - Gewicht (~ 2 kg) - Ergonomie (Lotstock oder vor Körper zu tragen=unpraktisch) - Preis (~ 14.000 DM)
Fujitsu Stylistic 3500	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Rechenleistung - gute Ausstattung - Display (800 x 600) 	<ul style="list-style-type: none"> - Preis (~ 10.000 DM) 	<ul style="list-style-type: none"> - schlechte Ergonomie - Akkulaufzeit < 3 Std. - keine Feldtauglichkeit
HH3	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Rechenleistung - gute Ausstattung - großes Display (10,4") - Feldtauglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Energieversorgung (3-4h) - integriertes Modem (GPRS fähig ?) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ergonomie (Lotstock oder vor Körper zu tragen = unpraktisch) - Gewicht (2,2 kg)
WearComp (Belt/VestPC)			
GAC PC	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute Ergonomie - feldtauglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechenleistung (233 MHz) - 3 COM mit Lemo-Stecker 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Preis (~14.000 DM) - Support-Kontakte
Mobile Assistant IV/V	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute Ergonomie 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechenleistung (266 MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Preis - altes Produkt
ViA II/III	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute Ergonomie - feldtauglich - hohe Rechenleistung - Feldtests/Praxiseinsatz bei GLA München 	<ul style="list-style-type: none"> - Energieversorgung (2 Akkus ~ 8 h) - Datenaustausch über PC-Card (Netz, CD-ROM) 	<ul style="list-style-type: none"> - Displayauflösung (480x600) - hoher Preis (14.000 DM)

Mobile Rechner Sommer 2002:


Produkte	Vorteil	+/-	Nachteil
WearComp (Belt/VestPC)			
CF-07	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute Ergonomie, durch kabelloses Display (Reichweite ca. 50m) - geringes Gewicht Display - feldtauglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Rechenleistung (300 MHz) - Autom Hintergrundbeleuchtung - Lesbarkeit Display in Sonne 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Preis (~7000,- €) - Energieversorgung (3h), keine 2. Batterie Display - Aufwecken aus Sleep-Modus nur an Base
Laptop			
CF-18	<ul style="list-style-type: none"> - Größe + Gewicht - feldtauglich - Touch-Screen 	<ul style="list-style-type: none"> - Lesbarkeit in Sonne - Energieversorgung (Zusatzakku notwendig) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ergonomie bei langem mobilen Einsatz

Applikationssoftware 2001:

Firma	LEICA/ESRI	Con terra	ESRI
Produkt	<i>Fieldlink/ FeldGIS neu</i>	<i>GISPAD2.1/GISPAD 3.0</i>	<i>ArcPad 5.01/6.0</i>
Status	<ul style="list-style-type: none"> - seit '99 keine Weiterentwicklung - letztes Release liegt vor (Diplomarbeit M. Nonnenmühlen) - neues Produkt mit neuem Entwicklungspartner für Herbst 2001 geplant, angeblich Vorstellung Intergeo 2001 - Softwareplattform wird ESRI-Technologie sein. Direkte Einbindung in ArcGIS-Welt (z.B. ArcSurvey) 	<ul style="list-style-type: none"> - GISPAD 2.1, 16Bit-Version, läuft aus, ca. 200 Lizenzen - GISPAD 3.0, 32Bit-Version seit 03/2001 im ersten Release auf dem Markt - 2.1/3.0 liegen als Demosoftware (temporäre Vollversion) vor 	<ul style="list-style-type: none"> - ArcPad 5.01 seit 2000 auf dem Markt, kaum Anwender in Deutschland - ArcPad 6.0 sollte Juni/Juli releast werden, allerdings wurde der Termin auf Oktober verschoben - 5.01 und 6.0_Beta-Realease liegen vor
Positiv	<ul style="list-style-type: none"> - stimmiges (Zukunfts-) Konzept (GIS+CAD+Geo) - Stärken in Geo (Ausgl., Kataster, Berechnungen) - Raster/Vektor ja + Georeferenzierung - Sensoranschluss (GPS, Tachymeter, LRF zum Teil) - Unterstützung im Projekt zugesagt 	<ul style="list-style-type: none"> - Version 2.1 stabiles System, 3.0 noch mit kleinen Macken - Sachdatenverwaltung top (objektorientiert/Metadaten) - Raster/Vektor + Georeferenzierung - Firma mit langer Erfahrung auf dem Markt, ESRI-Partner - Support bei Diplomarbeit vorbildlich 	<ul style="list-style-type: none"> - WebGIS schon realisiert - kostengünstig (Version 6.0 ~ 1000,- DM) - Datenformat 1:1 - PDA optimiert (Menüscrolls) - Erweiterbarkeit über Customizing-Konzept (VBA, C++) - Unterstützung zugesagt
+/-		<ul style="list-style-type: none"> - kleine Firma - laut GLA und conterra auch recht offen; Eigenentwicklung sind unter der Programmiersprache DELPHI möglich ! Erheblicher AUFWAND ! - ausreichen CAD-Funktionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Projektvor/nachbereitung immer in ArcView ! - basiert auf WinCE, aber WinNT/9x lauffähig - keine DB, filebasiert (Shape)
Negativ	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Messdatenspeicherung und -verwaltung - keine objektorientierte DB - keine Verfahrensstruktur - kein fertiges Produkt - Termine unklar - große Firma - kein WebGIS 	<ul style="list-style-type: none"> - nur ein Sensor (GPS) - keine geodätischen Berechnungen - kein WebGIS - keine Undo-Funktion - laut Hr. Heisig v. 05/2001 hat conterra im Moment kaum Kapazitäten für Zusatzprogrammierungen frei ! - noch keine ausgearbeitet API - kein Hochschul-Support 	<ul style="list-style-type: none"> - keine geodät. Berechnung - kein CAD-Funkt. - nur 1 Sensor (GPS) - wenig Funktionen Plausibilitätskontrollen - kein Undo-Funktion - Zusatzprogrammierung notwendig !
Fazit	Zukunft ungewiss ! Man weiss nicht was kommt. Das geplante Konzept ist aber sehr gut und soll ein optimales Zusammenarbeiten von GIS+CAD+Geo liefern !	Ausgereifte Software mit Schwächen bei der Sensorik, geodätischen Berechnung. Fast eigenständiges GIS ! Nur mit Zusatzprogrammierung optimal einsetzbar ! Hervorragende Verfahrenssteuerung möglich.	Leicht zu bedienendes <u>Auskunfts-system</u> mit einfachen Erfassungsmöglichkeiten ! Erst ab Version 6.0 zu leistungsstärkerem mobilen GIS erweiterbar ! Eigenleistung notwendig, dafür flexibel und bietet WebGIS-Konzept. Baut auf ArcGIS auf !

Anhang B: Technische Spezifikationen SmobGIS-Komponenten

Tachymeter TCR307

	TCR303	TCR305	TCR307
Angle measurement	3", 1 mgon	5", 1.5 mgon	7", 2 mgon
Distance measurement *	3000m (with reflector) 2mm + 2ppm 80m (w/o reflector) 3mm + 2ppm		
Measuring time	3 s (w/o reflector up to 30m) 1 s (with reflector)		
Built-in programs	Setout / Surveying / Free Station / Area / Tie-distance		
Recording	Internal 4000 data records, RS232 interface for external connection		
Magnification	30 x		
Plummet	Laser: located in alidade, turning with the instrument, accuracy + 0.8mm at 1.5 m		

* High accuracy survey tasks, uses steel vertical axis, diametrical encoders for both vertical and horizontal circle readings

Wearable Computer:

ViA's next generation of wearable computers (ViA II) will incorporate a 600 MHz Crusoe microprocessor and will run Windows 98, Windows NT and Windows 2000. The lightweight body-worn PC was designed to work with ViA's new SVGA indoor readable display and new indoor/outdoor display. The product specifications listed below may change without notice:

- 600 MHz
- 64MB DDR SDRAM base configuration, up to 128MB DDR SDRAM
- 2.5 inch HDD, 6 GB or larger
- 2 Type 2 or 1Type 3 PCMCIA slots, card bus compliant
- PS-2 keyboard and mouse
- 1 USB, 1 RS-232
- Panel Link digital video and RGB analog video, 2 MB video memory
- Full duplex analog audio
- 8.4" digital view touch pad display designed for both indoor and outdoor operation
- Weighs less than 22 oz.



ViA, Inc.
12550 West Frontage Road, Ste. 201
Burnsville, MN 55337

PH: 952-736-3128
FX: 952-736-5944
www.via-pc.com



Computers that fit peopleSM

Tablet-PC CF-18:

CPU	Intel® Pentium® M Prozessor 733 (Ultra Low Voltage 1,1 GHz)
L2 Cache	2 MB On-Die
Chipsatz	Intel® 855GM
RAM	512 MB DDR-SDRAM (erweiterbar auf 1512 MB)
Grafikchip	Intel® 855GM Grafikkontroller, UMA bis zu 64 MB
HDD	60 GB
LCD	Entspiegeltes, auch bei Tageslicht lesbares 10,4" Aktivmatrix (TFT) Farb-LCD Windows® XP mit Touchscreen oder Windows® XP Tablet PC Version mit Digitizer 1024x768 Pixel (XGA), 16 Millionen Farben, 340 cd
LCD-Gehäuse	Vollständig magnesiumlegiertes Gehäuse
Wireless LAN	Intel® Pro/Wireless 2915ABG Netzwerkverbindung, unterstützt IEEE 802.11a+b+g (54 Mbps) Bluetooth Integriert LAN Integriert, 100 BAS E-TX/10 BASE-T
Modem	Integriert, 56 kbps, V.92 kompatibel, 14,4 kbps Faxklasse
Sound	SigmaTel™ STAC9751TGCC1 AC-97 v.2.2 kompatibles Audio-Codec WAVE und MIDI Playback, Softwaresteuerung der Lautstärke
Lautsprecher	Integrierter Lautsprecher
Tastatur	83 Tasten für Europa (kompatibel mit Tastatur AT 102)
Zeigegeräte	Touchpad und Touchscreen oder Digitizer
Anzeigeelemente	6 LEDs (Power, Akku, HDD, NumLK, CapsLK, ScrLK)
Schnittstellen	Seriell (16550A kompatibel): D-sub 9-pin (nur bei Microsoft® Windows® XP Professional Ausführung) Externer Bildschirm (VGA-Port): D-sub 15-pin Kopfhörer: Minibuchse (Stereo) Mikrofon: Minibuchse (Mono) DC Eingang: Buchse USB 2.0: 2x 4-pin Modem: RJ11 Buchse LAN: RJ45 Buchse Portreplikator: 100-pin
Erweiterungsschächte	PC-Kartenschächte: 2x Typ II (PCMCIA) Optionales RAM-Modul: 1x SO-DIMM
Power	Akku: Lithium-Ionen (7,4 V, 7,05 Ah) Akkulaufzeit: ca. 8,5 Stunden (abhängig von den Bedingungen) Ladezeit: ca. 3,5 Stunden/aus, 7 Stunden/ein (abhängig von den Bedingungen)
Power Management	Standby-Funktion, Schlummerfunktion, ACPI BIOS AC Adapter AC 100 V ~ 240 V, 50/60 Hz, automatische Erfassung/Umschaltung, DC 16 V, 2,5 A
OS	Microsoft® Windows® XP Professional Service Pack 2 mit Advanced Security Technologie oder Microsoft® Windows® XP Tablet PC Edition 2005 Hand Writing & Display Rotation Tool von Panasonic
Abmessungen	(BxHxT) 271 mm x 49 mm x 216 mm (ohne herausragende Elemente)
Gewicht	2,1 kg
Integrierbare Optionen	GSM/GPRS, GPS, SmartCard Reader
Testverfahren	Test auf Wasserbeständigkeit: IEC529 (JIS C0920) IPX4, MIL-STD 810F 506.4-III Test auf Staubbeständigkeit: IEC529 (JIS C0920) IP5X, MIL-STD 810F 510.4-Level Gravitationstest auf Fallbeständigkeit: MIL-STD 810F 516.5 (Fall aus 90 cm) Test auf Vibrationsbeständigkeit: MIL-STD 514.5 Kategorie EMI Test: MIL-STD 461E

Compaq iPaq 3630:

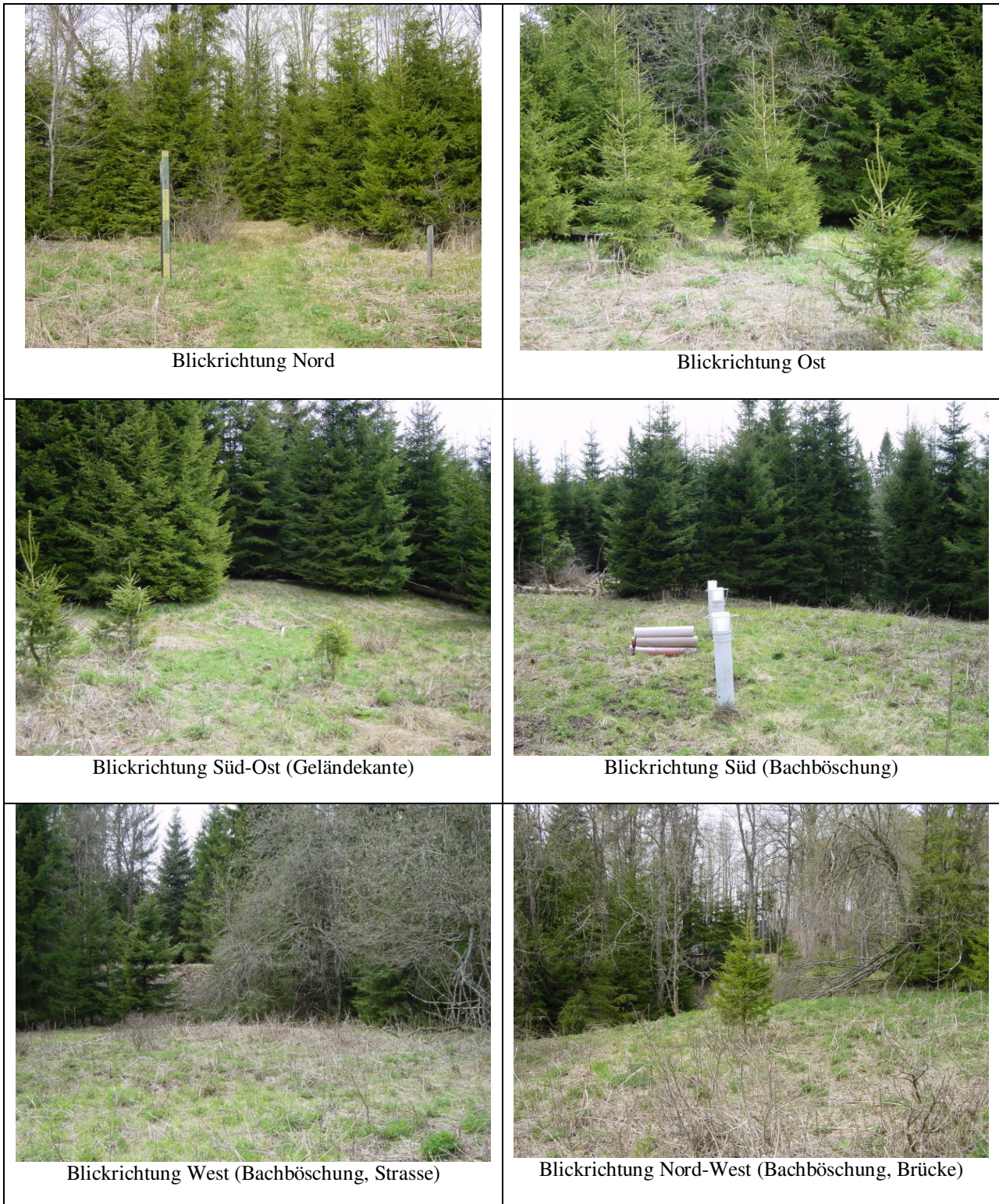
Prozessor	Intel StrongARM Prozessor, 206 MHz
Maße (Länge/Breite/Tiefe)	13 / 8 / 1,6 cm
Gewicht	182 g
Schnittstellen	RS 232, IrDA
Stromversorgung	Integrierter Lithium-Polymer-Akku
Durchschnittliche Betriebsdauer	Max. 10 Stunden Dauerbetrieb
Display	Hochreflektives TFT Farbdisplay
Displaymaße (sichtbare Diagonale)	7,7 x 5,8 cm (9,6 cm)
Farben	4086
Auflösung in Pixeln	240 x 320
Hintergrundbeleuchtung	Ja
Betriebssystem	Windows CE 3.0
Texteingabe	Touchscreen mit Handschrifterkennung, virtuelle Tastatur
Synchronisation möglich mit:	Microsoft ActiveSync, Microsoft Outlook

Anhang C: Testpunkte DGMMatch

RAST1 (Testgebiet Schachtenau)

Freifläche umgeben von einzelnen Laub- und Nadelbäumen oder geschlossenem Nadelwald, relativ eben mit markanten Geländeformen (Bachböschung, Strasse, kleine Geländekante).

Zielweiten: 8 m - 49 m



DICK1 (Testgebiet Schachtenau)

Rand Stangenholz / Jungwald, sehr schlechte Sichten, kaum markante DGM-Punkte (kleine Geländekante, Mulde)

Zielweiten: 3 m - 33 m



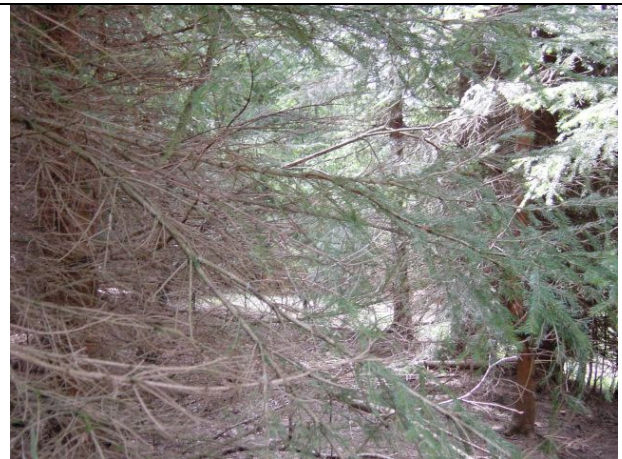
Blickrichtung Nord



Blickrichtung Ost



Blickrichtung Süd-Ost



Blickrichtung Süd



Blickrichtung West



Geländekante

STANG1 (Testgebiet Schachtenau)

Stangenwald, kurze Sichten, eben mit wenigen markanten Geländepunkten. Ostseite mit langgestreckten, in gleicher Richtung verlaufenden Geländeformen (Strasse, Bach)

Zielweiten: 3 m – 27 m



SCHEU3 (Testgebiet Scheuereck)

Altbestand, gleichmäßig geneigter Hang mit einigen, wenigen Unebenheiten sowie durchlaufender Strasse (mit leichter Böschung)

Zielweiten: 12 m – 68 m



Blickrichtung Nord-Ost (Strasse)



Blickrichtung Ost (Strasse)



Blickrichtung Süd



Blickrichtung Süd-West



Blickrichtung West



Blickrichtung Nord-West

SCHEU6 (Testgebiet Scheuereck)

Windbruch ausgeräumt, gleichmäßig geneigter Hang mit einigen, wenigen Unebenheiten sowie durchlaufender Strasse (mit leichter Böschung)

Zielweiten: 12 m – 68 m



Blickrichtung Nord



Blickrichtung Ost



Blickrichtung Süd-Ost



Blickrichtung Süd



Blickrichtung West (Strasse)

MISCH2 (Testgebiet Rehruck)

Altbestand, lange Sichten, kleinräumig wenig markante Geländeformen großflächige Senke.

Zielweiten: 9 m – 89 m



Blickrichtung Nord-Ost



Blickrichtung Ost



Blickrichtung Süd (Senke)



Blickrichtung West



Blickrichtung Nord