

# Das Projekt HPPS - Ideen und Realisierung

Cord-Hinrich Jahn  
Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)  
Podbielskistr. 331, 30659 Hannover  
[cord-hinrich.jahn@lgn.niedersachsen.de](mailto:cord-hinrich.jahn@lgn.niedersachsen.de)

Steffen Wildt  
Geodätisches Institut TU Dresden  
01062 Dresden  
[stewil@gmx.de](mailto:stewil@gmx.de)

Sven Martin  
ASTRIUM GmbH  
81663 München  
[sven.martin@astrium-space.com](mailto:sven.martin@astrium-space.com)

## Abstract

Die klassischen Festpunktfelder gehören weitgehend der Vergangenheit an. Dies gilt sowohl für die Jahrzehnte lange Aufgabe der Einrichtung, Erhaltung und Nachweise, als auch für die praktikable Einteilung in Lage, Höhe und Schwere.

Dreidimensionale Festpunktfelder gestützt auf Permanentstationen, die man heute als aktive Stationen bezeichnen kann, haben die Aufgaben der bisherigen „Lage“ übernommen und sind zunehmend dabei auch den Bereich „Höhe“ zu revolutionieren. Lediglich der am Gravitationspotential orientierte Schwerebezug ist und bleibt auch zukünftig ein Exot unter den Festpunktfeldern.

Mit dem Aufbau des satellitengestützten Positionierungsdienstes SAPOS durch die deutsche Landesvermessung hat sich das Vermessungswesen – wie in der Vergangenheit auch – modernen Entwicklungen angepasst. Der flächendeckende Aufbau von SAPOS in Deutschland ist Beweis genug, dass diese Technik inzwischen zum Standardwerkzeug geworden ist und damit im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Personalentwicklung tiefgreifende Veränderungen bewirkt hat.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben HPPS hat hier wertvolle Vorarbeit geleistet, insbesondere weil die Ideen eines festpunktlosen Festpunktfeldes frühzeitig aufgegriffen und zielorientiert umgesetzt wurden. Dabei wurden Ideen der Wissenschaft (Geodäsie und Kommunikation) und praktische Umsetzung (Landesvermessung) gewinnbringend kombiniert. Der Werdegang dieses, durch das DLR geförderten Vorhabens, ist Inhalt des vorliegenden Berichts.

## Einleitung

Die Ideen zum Aufbau eines Festpunktfeldes ohne Festpunkte gehen zurück auf Vanicek u.a. 1983, die bereits 1983 die geodätischen Anforderungen beschrieben, sowie auf Augath 1993, der diese Ideen auf die Belange der Landesvermessung zuschnitt, bei denen ein nationales Referenzsystem, das sich aus einer begrenzten Anzahl von Punkten zu-

sammensetzt, an ein übergeordnetes hochgenaues Bezugssystem angeschlossen wird. Aus heutiger Sicht würde dabei ein Netz aus Permanentstationen (SAPOS-Referenzstationen) im europäischen Rahmen ETRF 89 (European Terrestrial Reference System) gelagert werden. Vanicek u.a. gaben den klassischen Festpunktfeldern keine langen Überlebenschancen.

In Niedersachsen mündeten diese Überlegungen 1992 in der Formulierung eines Forschungsantrages, dessen Ziel es war, eine near-online Positionierung in der Landesvermessung mit Hilfe eines Netzes permanent messender GPS-Empfänger auf Referenzstationen zu ermöglichen. Das Projekt wurde unter dem Namen HPPS (Hochpräziser Permanenter Positionierungs-Service) national und international bekannt.

Dieses Forschungsvorhaben wurde zwischen 1992 und 1996 zunächst von der DARA (Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten) und von 1996 bis 2000 vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) gefördert. Durch diese Projekte flossen insgesamt 1,4 Millionen Euro (Personal- und Sachkosten) in diese Entwicklungen, die als Kooperationsvorhaben zwischen der Verwaltung (Landesvermessung) und Universitäten (Braunschweig und Dresden) konzipiert waren. Somit war gewährleistet, dass Praxis und Theorie optimal aufeinander abgestimmt wurden.

### **Das Projekt HPPS (Projektpartner der LGN, Hannover)**

Die Grundideen des HPPS (beziehungsweise eines beliebigen satellitengestützten Positionierungsdienstes) basieren auf einer Reihe systematisch verteilter Permanentstationen bzw. Referenzstationen, die eine Landesfläche möglichst gleichmäßig überdecken.

Der durchschnittliche Abstand dieser Stationen (in Niedersachsen 40 - 60 km) orientiert sich einerseits an dem allgemeinen Fehlerbudget bei Satellitenvermessungen (Entfernungsabhängigkeiten), andererseits an wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die für ein Flächenland eine andere Bedeutung haben als für einen Stadtstaat. Grundlegende Untersuchungen zu diesem Thema wurden bereits in der ersten Förderungsstufe vollzogen (Jahn, 1997).

Der Aufbau und der Betrieb eines präoperationellen Dienstes von HPPS bildete den Schwerpunkt der Arbeiten der LGN innerhalb des Gesamtprojektes. Dazu wurden in Südniedersachsen seit 1996 neue Permanentstationen aufgebaut und betrieben.

Niedersachsen hat darüber hinaus 1998 unter dem Konzept SAPOS beschlossen, einen flächendeckenden vernetzten Positionierungsdienst aufzubauen. Dieser Aufbau wurde Ende 2001 abgeschlossen, so dass ab Januar 2002 ein landesweiter Dienst für cm-Positionierungen zur Verfügung stand.

Die Kombination zwischen den praktischen Arbeiten in der LGN und den wichtigen wissenschaftlichen Untersuchungen der beteiligten Universitäten, spiegelt sich auch in dieser Veröffentlichung wieder und mündete in Veröffentlichungen auf zahlreichen nationalen und internationalen Kongressen (Jahn, 1999; Augath und Jahn, 1998; Martin und Jahn, 1998; Jahn und Winter, 2002). Ergebnisse wurden auch während eines eintägigen Seminars vor mehr als 300 Teilnehmern präsentiert (Jahn, 1997).

## Aufbau eines präoperationellen Dauerbetriebes

Eine Teilaufgabe von HPPS bestand im Aufbau und Nutzung eines Dauerbetriebes in einer begrenzten Region. Dazu wurde zu Beginn des Projektes das Vernetzungsgebiet Südniedersachsen beplant. Zu den bereits existierenden Stationen Hannover und Braunschweig kamen im Laufe des Projektzeitraumes die Stationen Clausthal-Zellerfeld (1996/97), Göttingen (1997), Alfeld (1997) und Hildesheim (1999) hinzu (Abb. 1).

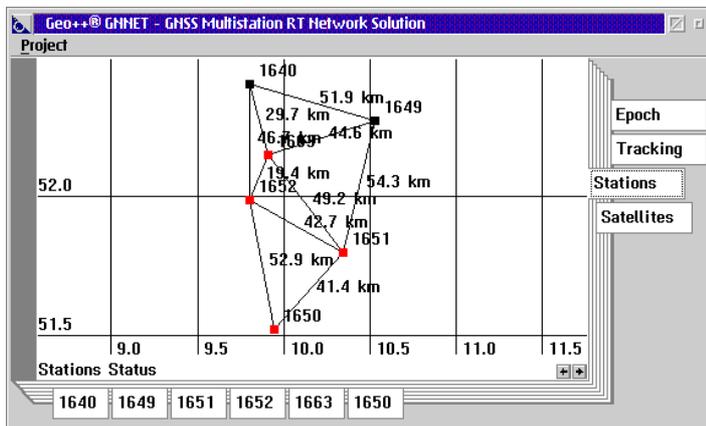


Abbildung 1: HPPS-Vernetzungsgebiet dargestellt im Programm GNNET

Die Daten der beteiligten Stationen wurden in der Rechenzentrale (Hannover) per Funk im 2m-Band in Echtzeit gesammelt und ausgewertet (Vernetzung). Die dabei berechneten Flächenkorrekturparameter (s.u.) wurden anschließend über die beteiligten Sender wieder abgegeben.

Die Korrekturdaten innerhalb des Messgebietes standen den Nutzern für Echtzeitanwendungen zur Verfügung, wobei durch die Abstände zwischen den Stationen entfernungsabhängige Restfehler auftraten und Roverpositionen systematisch verfälscht wurden. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde das Verfahren der **Vernetzung von Permanentstationen** mitentwickelt und implementiert.

### Vernetzung von Permanentstationen

Fehler aus Satellitenbahnen und atmosphärischer Refraktion wirken im GPS-Fehlerhaushalt entfernungsabhängig, d.h. je größer die Entfernung zwischen Permanentstation und Rover wird, desto stärker können sich diese Effekte auf die GPS-Positionierung auswirken und zu großen Streuungen in den Lösungen, langen Initialisierungszeiten oder falschen Festsetzungen der Mehrdeutigkeiten führen. Eine Positionierung sollte im Idealfall frei von systematischen Fehlern sein und auch über große Entfernungen in Echtzeit Zentimetergenauigkeit liefern.

Hauptinflussgröße bildet die ionosphärische Refraktion (neben Satellitenbahn- und Troposphärenfehlern), die unterschiedlichen Aktivitäten unterworfen ist. Neben tages- und jahreszeitlichen Variationen finden Änderungen aufgrund der Sonnenaktivität statt.

Zur Verringerung oder gar Beseitigung dieser systematischen Restfehler müssen sie modelliert und an der Position bzw. den Rohdaten des Rovers angebracht werden. Dazu werden mit den Verfahren der *Vernetzung* (Wübbena u.a. 1996; Landau 1998; Wanninger

2000/1) die Daten der umliegenden Permanentstationen in Echtzeit zusammengeführt und ausgewertet. Die Parameter des Modells werden den Nutzern in Form von *Flächenkorrekturparametern* oder als *virtuelle Referenzstation* über verschiedene Kommunikationswege zugänglich gemacht.

Die Vernetzung bewirkt für die Feldstation (Rover) einen spürbaren Genauigkeitsgewinn, der sich einerseits in einer zuverlässigeren Koordinierung, andererseits in einer schnelleren Bestimmung der Mehrdeutigkeiten und damit der Koordinaten ausdrückt und im Idealfall zu einer Lösung von  $\pm 1$  cm führt.

Die Wirkungsweise dieser Fehlerelimination kann man in verschiedene Klassen unterschiedlicher Genauigkeitsstufen unterteilen. In der Tabelle 1 wird dabei zwischen den Korrekturen 1. bis 3. Art unterschieden.

Korrektur	Wirkungsweise	Genauigkeitsniveau
1. Art	DGPS-Korrekturdaten (L1/L2-Phasen)	1-5 cm
2. Art	Systematische lineare Restfehler	1-3 cm
3. Art	Systematische nichtlineare Restfehler	1 cm

Tabelle 1: Wirkungsweise von GPS-Fehlerelimination bei Vernetzung von GPS-Permanentstationen

Die Korrekturen 1. Art beinhalten die allgemein gebräuchlichen DGPS-Daten, wie sie von Permanentstationen bereitgestellt werden. Je nach Abstand der Stationen und Beträgen innerhalb des GPS-Fehlerhaushaltes können systematische Restfehler mit unterschiedlichem Beträgen verbleiben. Das Verfahren der Vernetzung wird neben den Fehlern 1. Art auch die Fehler 2. Art beseitigen, wobei nichtlineare Restfehler unberücksichtigt bleiben, die ihre Ursachen in nicht modellierbaren Restfehlern haben (z.B. lokale ionosphärische Störungen innerhalb einer Vernetzungsmasche). Diese lassen sich nur dann streng beseitigen, wenn die Feldstation aktiv in die Berechnung der Vernetzung einbezogen wird.

Es gibt unterschiedliche Argumente für eine Vernetzung aber auch einige, die die Grenzen des Verfahrens zeigen. Sie sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst, wobei zwischen positiv und negativ bzw. nicht möglich unterschieden wird.

Positiv	Negativ / nicht möglich
Schnelle Initialisierung im Feld	Beseitigt keine schlechte Satellitengeometrie
Elimination entfernungsabhängiger Fehler	Nur vernetzte Satelliten werden verwendet
Verwendung virtueller Permanentstationen	Positionierung nur aus Echtzeitdaten - nur kleine Datenblöcke tragen zur Lösung bei
Möglichkeiten des Monitorings und der Validierung	Positionierung nur aus Echtzeitdaten - keine Variationsmöglichkeiten bezüglich unterschiedlicher Modellierungen

Tabelle 2: Vorteile und Einschränkungen bei der Verwendung vernetzter Daten

### Ergebnisse von Testmessungen

Am Beispiel einer Liegenschaftsvermessung (Oktober 2001) soll die Qualität des vernetzten HPPS/SAPOS<sup>®</sup> in Niedersachsen demonstriert werden. Das Messgebiet liegt etwa 22 Kilometer nordöstlich von Hannover. Hier wurde 1994 ein Testnetz klassisch bestimmt (Draken 1996) und im Oktober 2001 nachgemessen. Durchschnittlich wurden dabei 6 -8 Satelliten beobachtet, die Standardabweichung des Einzelwertes der Lagekomponente betrug 13,5 mm. Die Messungen wurden bei deutlich erhöhten ionosphärischen Störungen (Faktor 4-9 des I-95 Index nach Wanninger 2000/2) durchgeführt.

Die Abbildungen 2 zeigt die Lageabweichungen zwischen den tachymetrisch bestimmten "Sollwerten" und den HPPS/SAPOS<sup>®</sup> - Messungen, die pro Punkt mit durchschnittlich drei Initialisierungen in zwei unabhängigen Aufstellungen durchgeführt wurden. Das Ergebnis zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung (95 %) mit den Sollwerten und minimale Überschreitungen der Restabweichungen.

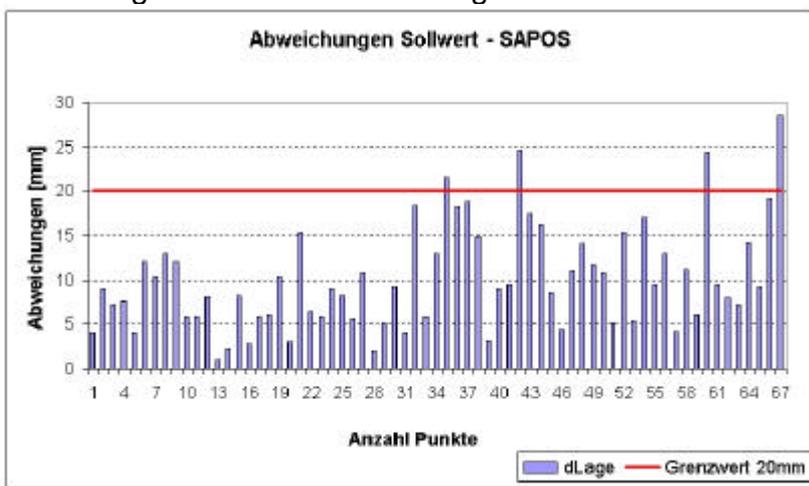


Abbildung 2: Lageabweichungen zwischen Sollwerten und HPPS / SAPOS<sup>®</sup> - Messungen

Auf dem Messdach der LGN in Hannover wurden Auswirkungen von systematischen Fehlern im Standort einer GPS-Antenne untersucht. Dazu wurde die Antenne auf einen automatisch gesteuerten Roboterarm aufgesetzt, von der Sollage um 40 mm exzentrisch positioniert und in einer 24-stündigen Bewegung um die Sollposition rotiert. Eine 30 km entfernte Permanentstation wurde - als Rover deklariert - an diese Station angeschlossen. Das Ergebnis dieses Experiments ist in Abbildung 3 dargestellt.

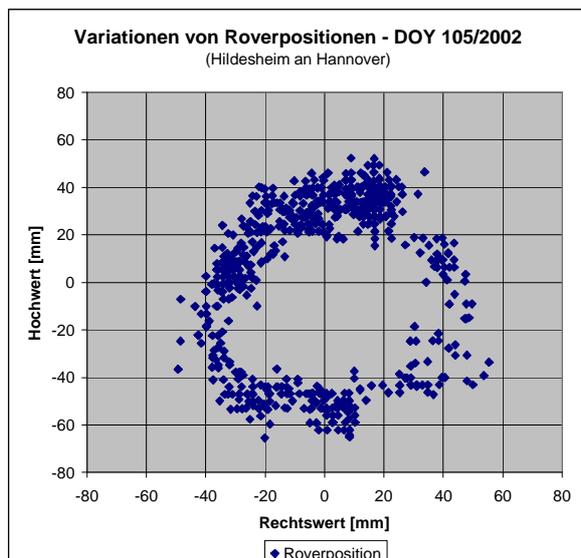


Abbildung 3: Position des Hildesheimer Rovers bezüglich systematischen Variationen der Permanentstation Hannover am 15.4.2002

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die eingestellte Exzentrizität der Antenne direkt in den Koordinaten des Rovers widerspiegelt. Daraus kann man schließen, dass sich dieser syste-

matische Fehler der Permanentstation unmittelbar in die Roverposition fortpflanzt. Auf der Grundlage dieser Erkenntnis werden die niedersächsischen Permanentstationen kontinuierlich validiert. Dieses geschieht einerseits durch die Analyse der täglich gesammelten RINEX-Daten, die zu Tages- und Wochenlösungen zusammengefasst und analysiert werden. Hieraus lassen sich langfristige Trends ableiten. Andererseits werden Echtzeitvalidierungen durchgeführt, bei denen Permanentstationen Roverfunktionen erhalten. Diese Berechnungen werden kontinuierlich vollzogen und stellen einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätsuntersuchung des niedersächsischen Permanentstationsnetzes dar.

### **Wissenschaftliches Begleitprogramm (Projektpartner der TU Dresden)**

Im Rahmen des Gesamtprojektes HPPS II wurde vom Geodätische Institut der TU Dresden das wissenschaftliche Begleitprogramm wahrgenommen. Bestandteil dieses Begleitprogramms war unter anderem die Untersuchung spezieller Fehlereinflüsse. Als spezielle Fehlereinflüsse sind vor allem die Effekte zu nennen, die einen erheblichen Einfluß auf die Lösungsgenauigkeit ausüben. Hierzu zählen insbesondere systematische Effekte wie Beugungerscheinungen, Mehrwegeeffekte, Variabilität und Exzentrizität des Antennenphasenzentrums sowie atmosphärische Störeinflüsse.

### **Antennenphasenzentrum**

GPS-Empfangsantennen für Referenzstationen weisen 2 Phasenzentren für die beiden L-Band-Signale auf. Im Allgemeinen sind diese 2 Phasenzentren weder identisch noch fallen sie mit dem geometrischen Referenzpunkt der Antenne zusammen. Vielmehr kommt es zu mehr oder weniger großen Abweichungen von diesem Referenzpunkt. Je nach Hersteller ist die Schwankungsbreite innerhalb einer Baureihe unterschiedlich ausgeprägt und liegt meist unter 1mm. Die Größe der Exzentren bewegt sich zwischen sub-mm und vielen mm bis cm. Werden Antennen unterschiedlichen Typs unkalibriert auf den Referenzstationen zum Einsatz gebracht ist mit teils deutlichen Abweichungen zu rechnen. Für die Anforderungen eines HPPS- Dienstes ist es unverzichtbar, ausschließlich kalibrierte Antennen einzusetzen. Dafür wurde ein Mess- und Auswertalgorithmus entwickelt, mit dem nicht nur der durchschnittliche Wert der Exzentrizität sondern auch die elevations- und ggf. azimutabhängigen Einflüsse bestimmt werden können [*Wanninger u. Böhme, 1999*].

Die Messungen finden auf eigens dafür eingerichteten Betonpfeilern statt. Derzeit werden in 4 Sessionen die Antennen für jeweils 24 Stunden nach definierten Azimuten ausgerichtet. Durch ergänzende Messungen gelingt ebenfalls die Bestimmung der Höhenexzentrizität bezüglich des Antennenreferenzpunktes. Die Auswertung liefert ein Protokoll mit zusätzlicher graphischer Darstellung der Ergebnisse. Es werden aus statistischen Gründen und zur Reduzierung von Mehrwegeeffekten 1-Stunden-Lösungen gebildet und diese dann zur mittleren Lösung für jede Antennenausrichtung zusammengefaßt. Sämtliche Daten aller Ausrichtungen gehen in die Ermittlung der elevationsabhängigen Anteile ein. Dazu wird der gesamte Azimut-Elevations-Bereich in Klassen eingeteilt.

Gegenstand der Untersuchungen war zum Einen die Bestimmbarkeit der Parameter als auch der Nachweis der Wiederholbarkeit der Ergebnisse. Daraus konnten auch Schlüsse zur Größenordnung der Schwankungen innerhalb einer Baureihe gezogen werden. Ver-

schiedene Untersuchungen zum Einfluss des Azimutes erbrachten keinen signifikanten Nachweis.

Die richtungsabhängigen Einflüsse sind zwar auch auf Punkten mit Abschattungen bestimmbar, jedoch durch das gewählte Verfahren nicht frei von den Einflüssen der Mehrwegeausbreitung. Diese können jedoch gering gehalten werden.

Die Einflüsse bei Antennen gleichen Typs (es wurden überwiegend Antennen des Herstellers TRIMBLE untersucht) sind etwa gleich groß, sodaß die Auswirkungen auf Basislinien bei gleicher Antennenorientierung gering sind. Wichtig ist das vor allem für die Arbeit auf Referenzstationen. Nur durch die Berücksichtigung der antennenspezifischen Offsets lassen sich beste Genauigkeiten erzielen. Das gilt in besonderem Maße, wenn mit unterschiedlichen Antennentypen gearbeitet werden muß. Da aber auch innerhalb einer Baureihe Schwankungen im mm-Bereich auftreten können, sollten insbesondere Referenzantennen kalibriert werden

### **Trägerphasenmehrwegeeffekte**

Einen großen Anteil beim GPS-Fehlerhaushalt liefert der Effekt der Mehrwegeausbreitung [Wildt, 1998]. Dabei erreichen Satellitensignale nicht nur auf direktem Wege die Empfangsantenne sondern auch nach Reflexion an dafür geeigneten Flächen oder nach einer Kantenbeugung. Am Empfänger selbst ist nur ein Mischsignal zu empfangen, welches sich aus möglicherweise mehreren Überlagerungen mit dem direkten Signal zusammensetzt. Daraus resultiert eine Phasenverschiebung im Phasenregelkreis. Dieser Fehler tritt infolge der permanenten Änderung der Satelliten-Reflektor-Empfänger-Geometrie periodisch auf und kann mit geeigneten Mitteln erkannt werden indem nach der endgültigen Koordinatenbestimmung die Restfehler ermittelt und dargestellt werden. Da diese Bestimmung bisher rein visuell stattfand wurde ein Algorithmus entwickelt, der eine automatisierte Detektierung und Analyse von Mehrwegeeffekten ermöglicht [Wanninger u. Wildt, 1997]. Die wichtigsten Leistungsparameter dieses Algorithmus sind:

- es wird der Einfluß der Mehrwegeausbreitung auf die Phasenmessung betrachtet, da diese die entscheidende Meßgröße für cm-Genauigkeit darstellt,
- es werden Meßdaten aus dem laufenden Betrieb der Referenzstationsnetze verwendet. Zusätzliche Messungen sind nicht notwendig.
- eine eindeutige Erkennung der gestörten Station und der betroffenen Signale ist möglich.

Der Algorithmus arbeitet mit der ionosphärenfreien Linearkombination L0. Diese bietet zwei Vorteile: Die Residuen enthalten wirklich nur den Anteil der Mehrwegeausbreitung und diese Residuen spiegeln diesen Anteil sehr gut wieder, da es zu einer Verstärkung des Einflusses bis zum vierfachen Wert der Originalgrößen kommt.

Der Algorithmus wurde vielfach getestet und erbrachte eine gute Wiederholbarkeit der Einflüsse. Damit ist gesichert, daß es sich tatsächlich um Mehrwegeausbreitung handelt. Als richtig hat sich die Annahme erwiesen, daß nicht alle Referenzstationen intensiv durch Mehrwegeausbreitung beeinflusst werden. Einige Stationen sind jedoch stark betroffen.

Mit dem Algorithmus sind wir in der Lage, Warnungen an Betreiber von Referenzstationen auszusprechen und Empfehlungen für mögliche Änderungen zu geben.

### Beugungseffekte

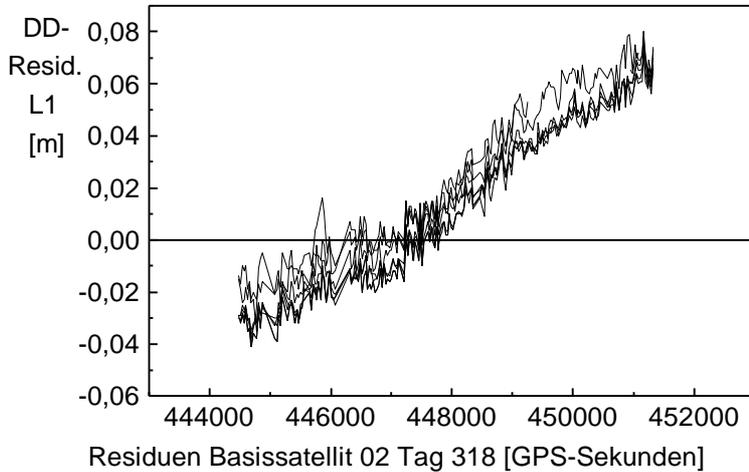


Abbildung 4: Beugungseffekte durch Signalabschattungen

Einen bedeutenden Fehlereinfluß stellen Beugungseffekte dar, die ähnlich der klassischen Erscheinungsform der Mehrwegeausbreitung (direkter + indirekter Signalanteil) eine satellitenortabhängige Wiederholbarkeit aufweisen. Sie können jedoch aufgrund des fehlenden direkten Signalanteils deutlich größere Fehler verursachen als die 'normale' Mehrwegeausbreitung. Als

Beispiel seien die Residuen auf einer sehr kurzen Basislinie (2m) angegeben. Eine Antenne war einem Sichthindernis ausgesetzt. Die Auswirkungen sind in obiger Abbildung zu sehen. Der Basissatellit 02 wird durch Beugungseffekte beeinflusst. Deshalb sind alle doppelten Differenzen zu diesem Satellit ebenfalls von diesen Störungen betroffen. Einflüsse dieser Art müssen erkannt und vermieden bzw. Korrekturen ermittelt und angebracht werden. Die Signal-Rausch-Verhältnisse der Beobachtungen enthalten in ihrer Rohform dafür wichtige Informationen. Nach der üblichen Wandlung in das empfängerunabhängige Datenformat Rinex geht jedoch häufig ein wesentlicher Teil dieser Information verloren.

### Virtuelle Referenzstation

Die Entwicklung des Konzeptes der virtuellen Referenzstation (KvR) ermöglichte es, atmosphärisch bedingte Effekte innerhalb einer Netzschleife zu berücksichtigen. Als Beispiel für die effektive Reduzierung der ionosphärischen Einflüsse durch den Einsatz des KvR sei folgende Tabelle erläutert [Wanninger, 2000/1]:

Auswertekonzept	Korrekt	$\sigma$ L/H [cm]	Ionosphäre	Algorith.
Standardauswertung 29km	92 %	1,2 / 1,9	ungestört	lang, L0
Virtuelle Referenzstation	97 %	1,0 / 1,6	ungestört	kurz, L1
Standardauswertung 29km	<b>8 % !</b>	- / -	gestört	lang, L0
Virtuelle Referenzstation	87 %	2,2 / 2,9	gestört	kurz, L1
Virtuelle Referenzstation	97 %	1,5 / 2,8	gestört	lang, L0

Diese Basislinie wurde bei der Standardauswertung als Verbindung eines Neupunktes (hier: eine koordinatenmäßig bekannte Referenzstation) zur nächstgelegenen Referenz-

station gebildet (29 km Basislinienlänge). Die virtuelle Referenzstation entstand aus den Daten von 3 umliegenden Referenzstationen in unmittelbarer Nähe des Neupunktes. Aus der Gesamtmesszeit von 5 Stunden bei ungestörter Ionosphäre und 5 Stunden bei gestörter Ionosphäre wurden durch Stückelung in 5-Minutenstücke je 60 Einzellösungen gebildet. Die Spalte Korrekt gibt wieder, wieviel % dieser Lösungen tatsächlich richtig sind. In der 3. Spalte sind Standardabweichungen für Lage und Höhe wiedergegeben. In der 4. Spalte wird der Zustand der Ionosphäre angegeben und die letzte Spalte enthält die Information über den verwendeten Auswertalgorithmus (lang, L0: Schema für lange Basislinien, Koordinatenlösung auf L0; kurz, L1: Schema für kurze Linien, Koordinaten nur aus L1-Beobachtungen). Bei ungestörter Ionosphäre stellt sich ein leichter Vorteil des KvR sowohl bei Anzahl richtiger Lösungen als auch der erreichten Genauigkeit ein. Die volle Leistungsfähigkeit des KvR zeigt sich jedoch bei gestörter Ionosphäre. Hier versagt der Standardansatz völlig. Eine Koordinatenbestimmung ist nicht möglich. Erst der Einsatz des KvR ermöglicht diese. Durch die Verwendung des Schemas für lange Basislinien werden noch einmal deutliche Verbesserungen erzielt, indem ionosphärische Restfehler besser berücksichtigt werden.

Durch die Anwendung des Konzeptes der virtuellen Referenzstationen (KvR) ergibt sich bei gleichbleibender Genauigkeit ein Vorteil in der Bearbeitungsgeschwindigkeit, da nur noch jeweils etwa ein Viertel der ursprünglichen Basislinienanzahl berechnet werden muß (bei 4 Referenzstationen). Das bringt ebenfalls Vorteile bei der Datenübertragung. Das Grundprinzip des KvR geht aus folgender Abbildung hervor.

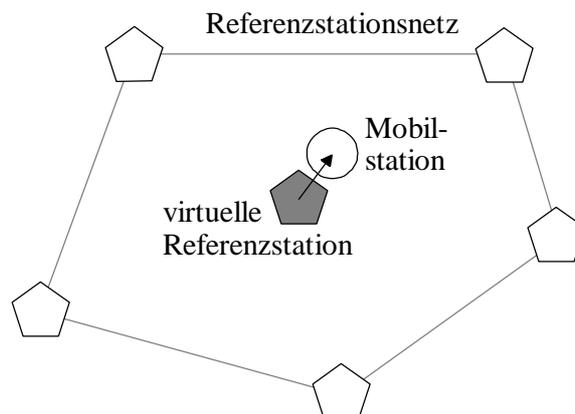


Abbildung 5: Grundprinzip zum Konzept der virtuellen Referenzstation

Aus den Daten eines einen Neupunkt umschließenden Referenzstationsnetzes werden die Beobachtungsgrößen für die virtuelle Referenzstation gerechnet. Diese befindet sich in unmittelbarer Nähe des Neupunktes (Koordinaten entsprechen den Näherungskoodinaten des Neupunktes aus einer Einzelstationslösung). Die gerechneten Beobachtungen werden nach Anbringen der verschiedenen Korrekturmodelle zum Neupunkt übertragen und dort mit Standardsoftware ausgewertet. Neben dem Effekt der Reduzierung verschiedener entfernungsabhängiger Fehler ergibt sich weiterhin eine Qualitätskontrolle der realen Referenzstationsdaten, eine Verringerung von Mehrwegeinflüssen sowie ein geringer Kommunikationsaufwand.

## **Spezifikation und Analyse geeigneter Kommunikationssysteme (Projektpartner der TU Braunschweig)**

Im Rahmen von HPPS wurden Untersuchungen zu Kommunikationssystemen, im Hinblick auf die unterschiedlichen Einsatzbedingungen durchgeführt. Dabei wurden neben Kurzstreckendatenübertragungen im wesentlichen die Broadcast-Links von der Referenzstation zum Nutzer im Feld betrachtet. Neben den technischen Aspekten der Datenraten und Reichweiten wurden auch solche Punkte wie laufende Kosten, Verfügbarkeit von Geräten am Markt und Datensicherheit berücksichtigt. Diese Veröffentlichung fasst noch einmal die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

### **Funkverfahren**

#### **Betriebsfunk**

Betriebsfunk wurde schon früh als Datenübertragungsmedium mit relativ geringer Übertragungsrate eingesetzt. In Deutschland liegen die Frequenzbereiche für Betriebsfunk zum einen im VHF-Bereich zwischen 140 MHz und 170 MHz und zum anderen im UHF-Bereich zwischen 430 MHz und 470 MHz. Das Kanalaraster ist 12,5 kHz, 20 kHz oder 25 kHz. Die Datenübertragungsrate beträgt in der Regel 2400 Bit/s- 19,2 kBit/s.

#### **Digital Audio Broadcast (DAB)**

Digital Audio Broadcasting (DAB) ist eine Entwicklung, die seit 1986 im Rahmen eines EUREKA-Projektes stattfindet. Dabei geht es um die Einführung eines digitalen Tonrundfunks vor allem im Hinblick auf den mobilen Einsatz der Empfänger. Ein entscheidender Vorteil von DAB ist die Möglichkeit neben der digitalen Toninformation auch eine variable Anzahl von Datendiensten zu übertragen.

Durch die spezielle Senderstruktur von DAB ist es möglich, regionale Korrekturdaten auszustrahlen, ähnlich der Konzeption einer hochgenauen Netzlösung in HPPS. Leider hat sich zum Projektende gezeigt, dass sich DAB nicht in dem erwarteten Maße durchsetzen konnte. Technische Probleme und geringe Akzeptanz haben DAB noch nicht über das Versuchsstadium hinaus gebracht. Im Gegensatz dazu bzw. als Weiterentwicklung muss DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) gesehen werden.

#### **Mobilfunk, GSM**

Die GSM Netze sind in Deutschland inzwischen weitgehend flächendeckend aufgebaut. Neben der Sprachkommunikation ist eine Datenübertragung mit 9600 bit/s bzw. bei Kanalbündelung bis 19,2 kbit/s möglich.

Jede der Permanentstationen ist mittlerweile über Mobilfunk erreichbar. In der ersten Phase des Projektes war dies eigentlich für Post-Processing und near-online Zugriffe gedacht. Die Referenzstationssoftware wurde dann dahingehend modifiziert, dass die Korrekturdaten auch in Echtzeit an den Nutzer im Feld übermittelt werden können. Zur Zeit werden die RTCM-Typen 18/19 und 20/21 in Echtzeit über GSM zur Verfügung gestellt. Nachteil dieses Übertragungsweges ist die begrenzte Anzahl von parallelen Nutzern an einer Referenzstation.

Der Vorteil von GSM besteht darin, dass eine eigene Senderinfrastruktur aufgebaut werden muss, keine Frequenzgenehmigungsverfahren anfallen und damit die Kosten sowohl für den Betreiber, was den Aufbau von Referenzstationen angeht, als auch für den Nutzer,

der die preisgünstigen, subventionierten Mobiltelefone der Netzanbieter verwenden kann, sehr gering bleiben.

Für einen Übergang auf höhere Datenraten und umfangreichere Korrekturdaten bietet sich UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) an. Der Aufbau von Sendernetzen und die Entwicklung von Endgeräten wird von der Industrie forciert. Datenraten von 2 Mbit/s sollen damit möglich sein.

## DVB-T

Nach der Einführung der digitalen Satellitenübertragung (DVB-S) und der Verbreitung digitaler Fernsehprogramme über Kabel (DVB-C) arbeitet die Initiative Digitaler Rundfunk (IDR) derzeit an einem Übergangsszenario vom analogen zum digitalen terrestrischen Fernsehen. Als zukünftiges terrestrisches Fernsehsystem kommt das digitale Fernsehen gemäß dem vom DVB-Projekt erarbeiteten Standard EN 300 744 in Frage. DVB-T wurde in erster Linie für den stationären und portablen Empfang konzipiert. Auch der Mobilempfang wurde mittlerweile erfolgreich demonstriert. In Zusammenarbeit mit dem DVB-T Projekt „Norddeutschland“ wurden bereits Standards für DGNSS-Übertragung innerhalb von DVB-T entwickelt. Diese sind in der EN 301 192 – „Digital Video Broadcasting – DVB Specification for data broadcasting“ [2] festgeschrieben.

## Simulationen und Messungen der Empfangsqualität

Von der theoretischen Seite her wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die es erlaubt eine Feldstärkeprognose für die Umgebung eines HPPS-Senders zu erstellen. Mit Hilfe dieses Modells wurden reale Geländedaten, die von der Landesvermessung Niedersachsen zur Verfügung gestellt wurden, zur Feldstärkeberechnung herangezogen. Simulationsergebnisse für einen Geländeschnitt finden sich in Abbildung . Die Ausbreitung wurde hier exemplarisch entlang einer Geraden von Clausthal-Zellerfeld nach Göttingen berechnet.

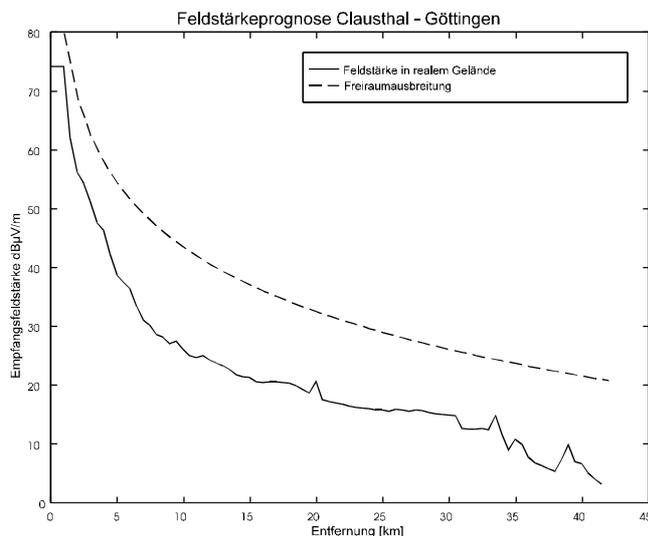


Abbildung 6: Simulationsergebnis der Feldstärkeprognose

Es wurden auch Feldversuche zur Messung der Empfangsbedingungen gemacht, um einerseits das Modell zu validieren, andererseits aber auch um Bedingungen zu erfassen, die im Modell nicht berücksichtigt werden.

Die Versuche wurden mit einem Feldstärkemessgerät der Firma Rohde&Schwarz und mit einem leicht modifizierten DGPS Empfänger durchgeführt. Der DGPS Empfänger ist von der Hardware in der Lage ein RSSI (Received Signal Strength Indicator) Signal auszugeben. Zum Empfang wurde eine omnidirektionale Antenne auf einem Autodach montiert. Die Versuche fanden in Braunschweig und Umgebung statt.

Die Position wurde mit einem GPS-Empfänger bestimmt, der gleichzeitig auch das Alter der empfangenen Korrekturdaten (AoD-Age of Data) ausgibt. Dieses AoD diente als Qualitätsindikator für den Korrekturdatenempfang.

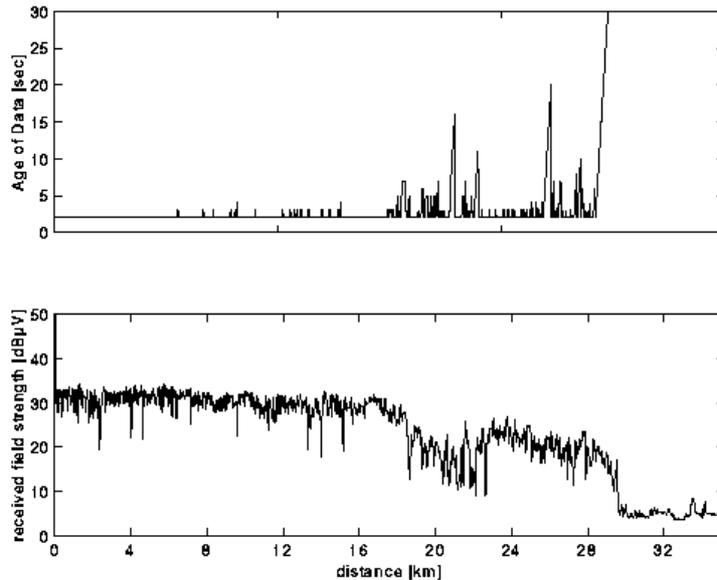


Abbildung 7: Feldstärkemessungen mit einem DGPS Empfänger

Bei ungestörten Empfangsbedingungen beträgt das Alter der Daten ca. 1-2 sec. Wird der Empfang nun auf Grund von Störungen oder Reichweitenüberschreitungen zu schwach, können die RTCM Daten nicht mehr korrekt decodiert werden. Dies macht sich in einem Ansteigen des AoD bemerkbar. Die Versuche haben gezeigt, dass unterhalb einer Empfangsfeldstärke von 18 dB $\mu$ V kein Empfang mehr möglich ist. Dies korrespondiert mit einer maximalen Reichweite, je nach Gelände, von 25-30 km. Bei exponierten Standorten sind auch 40 km möglich.

### Ausblick Kommunikation

Es hat sich im Rahmen von HPPS gezeigt, dass die beiden Broadcastmedien VHF-Funk und GSM die größte Akzeptanz und Verbreitung gefunden haben. Durch den rapiden Preisverfall bei den Mobilfunktarifen und -telefonen konnte sich dieses Übertragungsmedium, neben dem Aufbau eines eigenen Sendernetzes im VHF-Bereich, als sehr zuverlässiges und unter Umständen kostengünstigeres Medium durchsetzen. Anwender, die nur gelegentlich Korrekturdaten benötigen, sind mit GSM besser bedient. Vielnutzer hingegen kommen nicht an dem Medium VHF-Funk vorbei. Dies zeigt sich besonders dann, wenn eine größere Zahl von Nutzern in einem räumlich begrenzten Gebiet arbeitet und alle gleichzeitig die Daten benötigen. Im Hinblick auf die weiter steigende Zahl von Anwendern, den fortschreitenden flächendeckenden Ausbau des VHF-Sendernetzes und der generell herrschenden Frequenzknappheit sollten zukünftige digitale Übertragungsmedien in dieses Konzept integriert werden. DVB-T sollte auf Grund des guten Ausbauszustandes und der sehr hohen Datenkapazität und Übertragungsraten als langfristige Alternative zu VHF-Funk in Betracht gezogen werden. Auch UMTS und damit die dritte Generation von Mobiltelefonen verspricht höhere Datenübertragungsraten, sicheren Verbindungsaufbau und Mehrwertdienste unterschiedlichster Art. Eine Übertragung von DGNSS-Daten sollte damit auch problemlos möglich sein. Die Untersuchungen, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sinnvoll ist Korrekturdaten nicht nur über ein Medium zu verbreiten, sondern dem Nutzer eine Auswahl der für ihn günstigsten Bezugsmöglichkeiten für diese Daten anzubieten.

## Folgen für die Arbeiten der Landesvermessung

Mit dem Aufbau und Betrieb von GPS-Permanentstationen geht zeitgleich eine Reduktion im klassischen Lage-Festpunktfeld einher. In Niedersachsen wird dieses Festpunktfeld nicht mehr gepflegt, so dass 23000 Trigonometrische Punkte in den Status des "*Virtuellen Festpunktfeldes*" übergehen. Sie stehen in den Nachweisen der Landesvermessung weiterhin zur Verfügung, werden aber vor Ort nicht mehr erhalten.

Dieses virtuelle Festpunktfeld ist nun allerdings nicht etwa als historisch an zu sehen, sondern hat weiterhin einen hohen Stellenwert, denn es wird heute für den Datumsübergang zwischen dem amtlichen Bezugssystem der Landesvermessung LS 100 und dem SAPOS-Bezugssystem ETRS 89 verwendet.

Eine Pflege dieses virtuellen Festpunktfeldes wird immer dann erforderlich, wenn zwischen der aktuellen Messepoche und der Entstehungsepoche größere Differenzen beziehungsweise Spannungen auftreten, deren Ursachen in *Oberflächenveränderungen* begründet sind und zu Verschiebungen in den Lage- und Höhenkomponenten führen. Diese meist lokal - selten regional - begrenzten Gebiete sind nicht selten Zonen aktiver Rohstoffentnahme.

Lokale Punktverschiebungen erhalten im Zeitalter von HPPS / SAPOS-Messungen einen höheren Stellenwert, da durch Anschluss an Permanentstationen vom klassischen Prinzip der *Nachbarschaft* abgewichen wird. Roverstationen werden über größere Entfernungen positioniert (erhebliche wirtschaftliche Vorteile), mit der Folge, dass Spannungen zwischen dem Mess- und Zielsystem direkt in die neuen Punktkoordinaten einfließen. Die Überwachung und Beseitigung dieser Spannungen gelingt recht einfach, wenn zwischen den Messtrupps vor Ort (Katasterbehörden, ÖBVI und Dritte) und dem Systembetreiber (Landesvermessung) ein kontinuierlicher Informationsaustausch erfolgt. Werden durch den Außendienst Soll-Ist-Abweichungen für bestimmte lokale Gebiete festgestellt, so kann die Landesvermessung durch gezielte Nachmessung weniger Punkte das Gebiet nachführen. Die Nutzung von HPPS / SAPOS-Verfahren wird sich mittelfristig auch auf das *Höhenbezugssystem* auswirken. Bereits heute führen GPS-Verfahren zu deutlichen Steigerungen in der Wirtschaftlichkeit verbunden mit homogeneren Genauigkeitsverteilungen über größere Entfernungsbereiche (Feldmann-Westendorf, 2002).

Abschließend wird unter dem Stichwort *Galileo* auf die langfristigen Entwicklungen in der Satellitenpositionierung hingewiesen. Durch den Einsatz mehrerer gleichwertiger System lassen sich *Genauigkeits- und Zuverlässigkeitskriterien* weiter verfeinern. So könnte zukünftig ein Roversystem in einem einzigen Messgang Satelliten verschiedener Systeme zur *Mehrdeutigkeitssuche* verwenden, um hochgenaue Koordinaten zu erzeugen. Zwar würden diese Messungen weiterhin unter gleichen Ausbreitungs- und Punktumgebungsbedingungen erfolgen, doch wäre das Hauptproblem der Zuverlässigkeit bei der Mehrdeutigkeitssuche wesentlich verbessert.

Die Autoren danken dem Institut für Ermessung, UNI Hannover für die Unterstützung bei den Robotermessungen zur Untersuchung systematischer Fehler.

(Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50 ND 9602 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim jeweiligen Autor.)

## Literatur

**Augath, W.** Konzepte für den Aufbau von 3D-Netzen der Landesvermessung. In Potthoff (Red.): Beitrag zum 31. DVW-Seminar in Dresden : GPS – eine universelle geodätische Methode. Schriftenreihe 11/1993 des DVW, Verlag Wittwer.

**Augath, W. und C.-H. Jahn** The High-Precision Positioning Service (HPPS) and its Application in Cadastral Surveying in Germany. Proceedings of the XXI FIG Congress, Commission 5, Brighton, pp 9-19.

**Draken, W.** Einsatz des GPS-Real-Time-Kinematik-Verfahrens zur Bestimmung von Aufnahmepunkten und bei Liegenschaftsvermessungen. Nachr. d. Nieders. Verm.- und Katasterverwaltung 46. (1996), Heft 4, S. 186-194.

**Feldmann-Westendorf, U.** Zur hochgenauen Bestimmung von Normalhöhen mit GPS-Postprocessing und -echtzeitverfahren in der Landesvermessung Niedersachsen. DVW-Seminar GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmung und RTK-Anwendungen, Karlsruhe 16.-17.9. 2002.

**Jahn, C.-H.** Der Hochpräzise Permanente Positionierungs-Service (HPPS). Ortung und Navigation, 1/97, S. 48-73.

**Jahn, C.-H.** HPPS-Seminar am 5.2.1998 in der LGN, Hannover.

**Jahn, C.-H.** Das DARA-Projekt HPPS II - Ziele und Ergebnisse. In:GPS-Praxis und Trends '97, Schriftenreihe 35/1999, Deutscher Verein für Vermessungswesen e.V., Verlag Konrad Wittwer, S. 222-235.

**Jahn C.-H. und R. Winter** SAPOS-HEPS in Niedersachsen. 4. SAPOS-Symposium, 21.-23. Mai 2002, Hannover. Proceedings, S. 22-36.

**Landau, H.** Zur Qualitätssicherung und Vernetzung von GPS-Referenzstationen. Vermessung und Raumordnung 60/8, S. 438-445, 1998.

**Martin, S. und C.-H. Jahn** High Precision Real-Time Differential Correction Network for Geodetic Applications. Proceedings of the ION-GPS-98, Nashville, TN, September 1998.

**Vanicek, P. u.a.** The Future of Geodetic Networks. Proceedings der IUGG-Generalversammlung in Hamburg, 1983, S. 372-279.

**Wanninger, L.** Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. DGK, Reihe C, Heft Nr. 508, München 2000/1.

**Wanninger, L.** Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung in Referenzstationsnetzen. 3. SAPOS-Symposium, München, 23./ 24.05.2000/2, S. 129-140.

**Wanninger, L., J. Böhme** GPS-Antennenkalibrierung am Geodätischen Institut der TU Dresden, Vortrag auf Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 28.04.1999

**Wanninger, L., Wildt, S.** Identifikation von Mehrwegeeffekten in GPS-Referenzstationsbeobachtungen, AVN 1/97, S.12-15

**Wildt, S.** Untersuchungen über den Einfluß von Mehrwegeeffekten bei GPS-Anwendungen, Vortrag auf dem HPPS- Seminar HPPS-Verfahren zur cm-Positionierung, in Veröffentlichung, Hannover, 05.02.1998

**Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier** Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the Institute of Navigation Satellite Meeting, Sept. 17-20, 1996, Kansas City, Missouri, pp. 1845-1852.