

Stationsspezifische Aspekte zum Redesign von GPS-Referenzstationen

Stefan Willgalis

Ingenieurbüro für Geodäsie und Geoinformation, Hannover, Germany

1 Einleitung

Koordinatenreferenzsysteme werden durch vermarkte Festpunkte und aktive GPS-Referenzstationen realisiert. Während es insbesondere in Deutschland infolge einer langen Tradition bewährte Standards für die Vermarkung von Lage- und Höhenfestpunkten gibt, zeichnen sich GPS-Referenzstationsstandorte weltweit durch eine große Vielfalt an Konstruktionsformen und Gründungen sowie Ausrüstungen aus.

GPS-Referenzstationen müssen mehreren Funktionen genügen. Sie sind Verknüpfungspunkte zwischen der Realisierung des übergeordneten Referenzsystems und dem jeweiligen Landesbezugssystem. Die Zeitreihen der GPS-Stationen sollen entweder zum Nachweis ihrer dauerhaften Stabilität oder tektonisch bedingter Bewegungen geeignet sein. In einen Satellitenpositionierungsdienst eingebunden dienen die Stationen der Bereitstellung des amtlichen Landesbezugssystems in Echtzeit mit Zentimetergenauigkeit.

Aus den Funktionen folgen hohe Anforderungen an die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Dauerhaftigkeit der GPS-Referenzstationen. Um diese zu gewährleisten, muss die aktive Referenzstation als ein Gesamtsystem mit allen ihren Bestandteilen betrachtet werden. Dazu gehören die GPS-Antenne mit Empfänger und Kabel, Anschlüsse für die Stromversorgung und die Datenkommunikation sowie die Konstruktion, auf der die GPS-Antenne angebracht ist, einschließlich aller Befestigungselemente, dem Untergrund und der Stationsumgebung.

Im Folgenden werden aus den Anforderungen an Referenzstationen und deren gegenwärtigem Wandel Schlussfolgerungen für das Design von Referenzstationen gezogen. Die dabei zu berücksichtigenden geologischen, topographischen, konstruktiven und elektrotechnischen Kriterien sowie ergänzenden Randbedingungen werden an Praxisbeispielen erläutert.

2 Anforderungen an GPS-Referenzstationen

Die Qualität einer GPS-Referenzstation hängt unter anderem ab von der Genauigkeit ihrer Stationskoordinate im globalen Referenzsystem und der Genauigkeit, mit der das Antennenphasenzentrum des permanent arbeitenden GPS-Empfängers diese Stationskoordinate realisiert. Um eine Beziehung zwischen dem Phasenzentrum und einer unabhängigen Vermarkung des Referenzstationspunktes herzustellen, sind eine Antennenkalibrierung und eine Exzentrizitätsmessung notwendig. Durch die Antennenkalibrierung werden die elektromagnetischen Phasenzentren (APC) der einzelnen GPS-Signale auf einen mechanisch eindeutigen Punkt des Antennengehäuses, den Antennenreferenzpunkt (ARP), bezogen. Von diesem Punkt aus werden die Exzentrizitäten zur Vermessungsmarke des Referenzpunktes gemessen (Abbildung 1).

Die langfristige Stabilität der aktiven Referenzstation sollte durch Auswahl eines geeigneten Standortes sowie einer zweckmäßigen Konstruktion (Monument) für die Antennenaufstellung gewährleistet sein. Veränderungen der konstruktiven Verhältnisse und der elektromagnetischen Einflüsse sind möglichst zu vermeiden, um durch lange kontinuierliche Zeitreihen eine

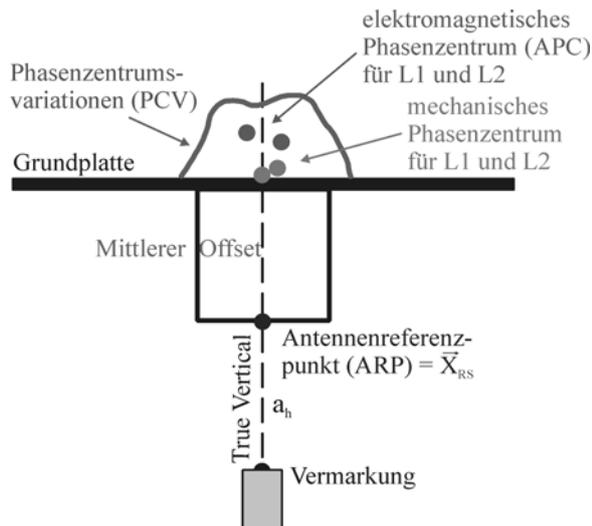


Abbildung 1: Geometrische Beziehung zwischen Referenzpunktvermarkung und Antennenphasenzentrum.

ausreichende Datenbasis für ein umfassendes Stationsmonitoring bereitstellen zu können. Die lückenlose Dokumentation von Veränderungen ist sicherzustellen. Die stationspezifischen Anteile des GPS-Fehlerbudgets sind im Gegensatz zu den entfernungsabhängig wirkenden Fehleranteilen der präzisen GPS-Positionierung bislang nur unzureichend modellierbar. Zu den stationsabhängig wirkenden Fehlern gehören:

- Laufzeitverzögerungen in der Empfängerhardware,
- Phasenzentrumsvariationen (PCV) der Antenne,
- Nahfeldeffekte,
- Mehrwegeausbreitung,
- Umgebungseinflüsse,
- Monumentinstabilität,
- Untergrundinstabilität.

Die Standardisierung des Aufbaus und der Ausstattung von GPS-Referenzstationen ermöglicht zumindest eine Reduktion stations- und gerätespezifischer Fehlereinflüsse, soweit sie auf den einzelnen Stationen in gleicher Weise wirksam sind. Mit der Antenne verbundene Elemente wie Grundplatten, Radome, Adapter und Zwangszentrierungen können in die Antennenkalibrierung einbezogen werden. Die auf Vorschläge zur Kalibrierung der Stationen selbst (Böder et al. 2001) zurückgehenden Untersuchungen haben bislang noch zu keinen Ergebnissen geführt, die für alle aktiven Stationen verallgemeinerbar sind (Dilßner 2004). Der ursprünglich zur absoluten Antennenkalibrierung eingesetzte Roboter ist aufgrund seiner Größe nicht auf allen Stationen einsetzbar. Außerdem wird er bei einer in situ Kalibrierung zum Bestandteil des Antenne-Monument-Systems und beeinflusst selbst den Signalempfang. Um Verfälschungen durch das Kalibriersystem auszuschließen, wird deshalb auch versucht, einige der stationsabhängigen Fehler aus den Beobachtungen einer Referenzstationsvernetzung zu schätzen.

Die Vereinheitlichung der Referenzstationen erleichtert darüber hinaus den Betrieb und die Wartung der Referenzstationen, was einschließlich der Beschaffung zu Kostenvorteilen führt. Die Standardisierung des Datenflusses im Referenznetz, der Datenaufbereitung und –archivierung sowie der Auswerteprozesse ist als Teil eines Qualitätssicherungskonzeptes ebenfalls unverzichtbar.

3 Richtlinien und Empfehlungen zur Standardisierung von GPS-Stationen

Die allgemeinen Anforderungen an den Aufbau, die Ausstattung und den Betrieb von aktiven GPS-Referenzstationen sind in verschiedenen Richtlinien und Empfehlungen detailliert ausgearbeitet. Die Richtlinien des EUREF Permanent GPS Network (EPN CB 2004) sollen wie die weitestgehend inhaltsgleichen Richtlinien des IGS CB (2004) sicherstellen, dass die verschiedenen im EPN und IGS zusammenarbeitenden Betreiber von Referenzstationen durch die Einhaltung von Standards und Konventionen ein vergleichbares Qualitätsniveau gewährleisten. Während die EPN-/IGS-Richtlinien ihren Schwerpunkt auf organisatorische Aspekte sowie den Datenfluss legen, machen beispielsweise die Richtlinien für die Continuously Operating Reference Stations (CORS) des U.S. NGS (2005) detailliertere Vorgaben zum Aufbau und zur Ausstattung der Referenzstationen.

Für die GPS-Stationen einzelner geodynamischer und geodätischer Referenznetze wurden anstelle von Richtlinien einzelne Berichte über die beabsichtigten oder durchgeführten Arbeiten veröffentlicht. Dazu gehören das japanische Geonet (Imakiere et al. 2004), die SCIGN GPS Site Monument Information (CSRS 2006) und die Beschreibung des Monument Designs des Western Canada Deformation Array (Schmidt et al. 2001). Die Anforderungen an SAPOS-Stationen wurden von der AdV (1998) sehr allgemein formuliert. Für den konkreten Aufbau und Betrieb der SAPOS-Stationen der Landesvermessungsverwaltungen gibt es ebenso wie für die Netze privater Referenzdienste wie ascos nur interne Arbeitsanweisungen. Das UNAVCO Konsortium unterstützt mit sehr umfassenden und detaillierten Informationen, die sich im wesentlichen auf die Erfahrungen in nordamerikanischen GPS-Netzen mit geophysikalischem Schwerpunkt stützen, die Betreiber von GPS-Stationen (UNAVCO 2006a). Behandelt werden die Installation von GPS-Permanentstationen, sowie Ausrüstung, Betrieb und Wartung.

4 Praxisbeispiele für GPS-Monumente

Die weltweit verwendeten Konstruktionen zur Aufstellung von GPS-Antennen weisen eine große Vielfalt auf. Dabei gleichen sich die Anforderungen an die Monumente weitestgehend. Sie müssen geeignet sein, durch Minimierung der stationsabhängigen Fehlereinflüsse die geodätischen oder geodynamischen Zielsetzungen langfristig zu erfüllen, unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Relation. Unterschiedliche Designs gründen sich hauptsächlich auf die topographischen und klimatischen Umgebungsverhältnisse und die geologischen Schichtverhältnisse im Untergrund der Stationen.

Abbildung 2 zeigt eine typische Auswahl an Monumenten. GPS-Referenzstationsantennen werden üblicherweise auf freistehenden Pfeilern, Rohren oder Masten aufgestellt, die mehr oder weniger tief im Untergrund verankert sind. Die SAPOS-Referenzstationen befinden sich dagegen hauptsächlich auf Pfeilern oder Masten auf Gebäuden. Für temporäre Messkampagnen werden GPS-Antennen auf Stativen eingesetzt, die über tief liegende Vermessungspunkte zentriert werden (Abbildung 2j). Für die extremen klimatischen Bedingungen der Antarktis wurden Vermarkungen entwickelt, die im anstehenden Fels eingebracht werden und zugleich als GPS-Antennenträger dienen (Abbildung 2i). Solche Bodenpunkte sind zwar unter mechanischen und geologischen Gesichtspunkten zweckmäßig, weisen aber aufgrund starker Mehrwegeausbreitung ungünstige Signalempfangseigenschaften auf.

Die Monumente sind in erster Linie nach ihrem konstruktiven Aufbau zu unterscheiden. Der klassische Vermessungspfeiler aus Beton mit Stahlbewehrung wird durch eine Außenisolierung gegen thermische Verformung geschützt. Alternativ werden betongefüllte Stahlrohre

verwendet (Abbildung 2a). Um die temperaturbedingte vertikale Ausdehnung der Pfeiler zu kontrollieren, kommen Invarstangen in einer Beton-/PVC-Hülle zum Einsatz (Abbildung 2c) oder der gesamte Pfeiler wird thermostatisiert (Abbildung 2b). Zur Reduzierung elektromagnetischer Einflüsse ist es günstig, den Anteil an leitenden metallenen Materialien zu verringern und deshalb mit Sand gefüllte Stahl-/PVC-Rohre einzusetzen (Abbildung 2d).

Sollen die GPS-Antennen bis zu 10 m über der Erdoberfläche zum Einsatz kommen, werden Beton- oder Metallmasten in Form von Schalentragwerken (Abbildung 2e,f) oder Gitterfachwerken (Abbildung 2h) bevorzugt. Das Prinzip einer fachwerkartigen Verstrebung zeigt auch Abbildung 2g, bei der die eingesetzten Metallrohre gleichzeitig zur Gründung in oberflächennahem Fels dienen. Für die Vermessungspfeiler aus Stahlbeton oder Stahlrohren sind sehr tiefe Bohrpfehlgründungen möglich, die jedoch sehr aufwändig sind und wesentlich höhere Kosten verursachen. Deshalb werden einige Monumente auch nur auf Block- oder Tellerfundamenten gegründet, ohne diese im anstehenden Fels zu verankern.

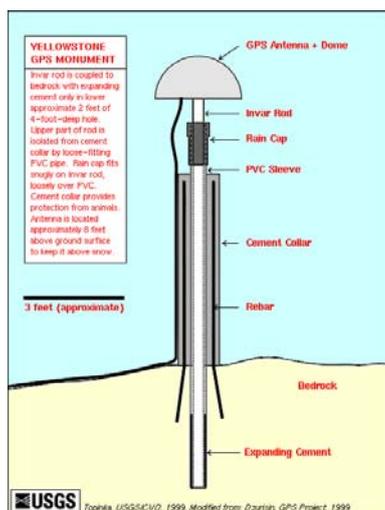
Weitere Unterscheidungsmerkmale ergeben sich aus der Unterbringung des GPS-Empfängers im Monument selbst oder in einem externen Container. Wesentlich ist auch, ob die Konstruktion ausschließlich als GPS-Station dient oder auch Bezugspunkt für das Nivellements- und Schwerenetz ist. Übersichten über weitere Konstruktionsformen mit Empfehlungen für den zweckmäßigen Einsatz stellen IGS CB (2006) und UNAVCO (2006b) zur Verfügung.



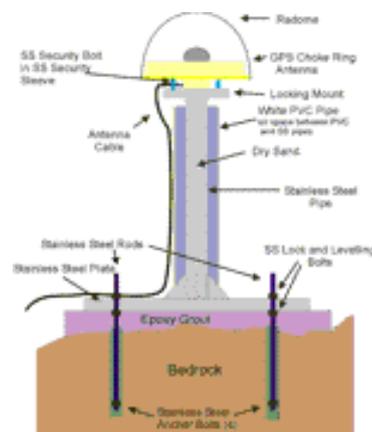
(a) GREF-Station Diepholz (D)
(BKG 2005)



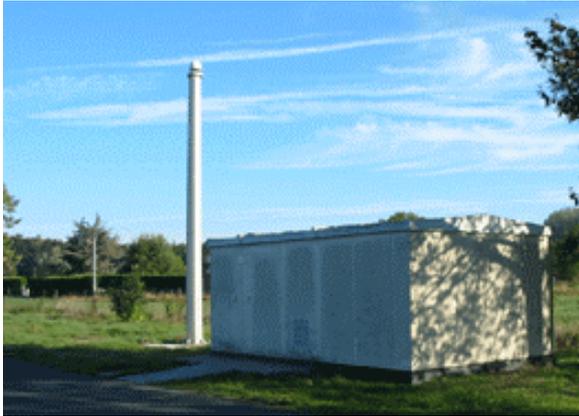
(b) Absolutgravimetriestation Smidstrup (DK)
(Timmen 2006)



(c) USGS Yellowstone Continuous GPS Network
(Dzursin 1999)



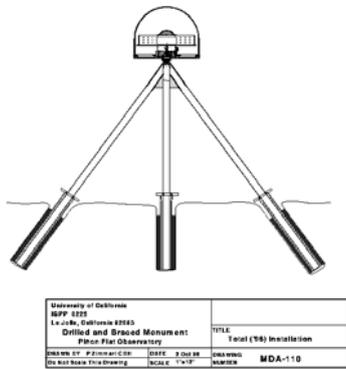
(d) WCDA-Station (CDN)
(Schmidt et al. 2001)



(e) WALCORS-Station KAIN (B)
(WALCORS 2006)



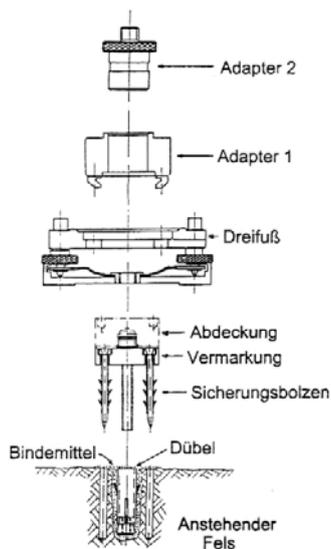
(f) GEONET-Station (JP)
(Imakiere et al. 2004)



(g) SCIGN Station (USA)
(CSRS 2006)



(h) AGNES-Station Martigny (CH)
(swisstopo 2006)



(i) GAP-Vermarkung (Antarktis)
(Lindner et al. 2000)



(j) LGN-Grundnetzplatte mit Höhenbolzen
(LGN Abt. 3)

Abbildung 2: Bilder unterschiedlicher Referenzstationsvermarkungen

5 Erweiterte Anforderungen an Stationsmonumente in integrierten Raumbezugssystemen

Mit den gestiegenen Anforderungen an die modernen Raumbezugssysteme müssen auch die Anforderungen an den Aufbau und die Ausstattung der GPS-Referenzstationen aktualisiert werden. In den modernen einheitlichen Raumbezugssystemen werden die zuvor getrennten Lage-, Höhen- und Schwerebezugssysteme integriert und mit den Referenzstationen verknüpft. Die arbeitsintensive terrestrische Bestimmung physikalischer Höhen wird zunehmend durch satellitengestützte Verfahren abgelöst, für die die Verfügbarkeit eines cm-Geoidmodells Voraussetzung ist. Angesichts der gestiegenen Genauigkeitsanforderungen an das Raum- und Höhenbezugssystem, dessen langfristige Stabilität aufgrund der Ausdünnung der Festpunktfelder sichergestellt werden muss, können die zeitabhängigen Prozesse des Systems Erde nicht mehr vernachlässigt werden. Diese sind durch eine Kombination von Beobachtungstechniken zu ermitteln. Die Auswirkungen auf das Raumbezugssystem sind zu bestimmen und mittels eines kinematischen Bezugssystems zu beschreiben.

Für die GPS-Referenznetze bedeutet dies, dass die GPS-Stationen mit den Netzen der anderen Messgrößen (Nivellement, Schwerebeschleunigung) hochgenau verknüpft werden müssen. Die Messmarken für die einzelnen Messgrößen sollten mit dem GPS-Monument physikalisch verbunden sein und eine rechnerische Zentrierung auf einen einheitlichen Raumbezugspunkt erlauben. Zur Überwachung der Stationen kann es sinnvoll sein, ergänzende Informationen z.B. über den Grundwasserstand oder meteorologische Parameter einfließen zu lassen.

Auf internationaler Ebene wird im Rahmen des IAG-Projektes Global Geodetic Observation System (GGOS) an der Integration verschiedener Beobachtungstechniken, Modelle und Auswertansätze gearbeitet. Der europäische Beitrag zu diesem Projekt ist das European Combined Geodetic Network (ECGN). Darin stellt insbesondere die Verknüpfung der Höhen- und Schwerebezugssysteme ein besonderes Ziel dar. Schwerpunktmäßig werden die Küstenregionen einbezogen, wo Küstenpegelbeobachtungen gemeinsam mit den anderen Messgrößen erfasst werden. Entsprechend den Zielsetzungen werden an die Materialisierung der ECGN-Stationen, die zugleich Bestandteil des EPN sind, besondere Anforderungen gestellt (Ihde et al. 2005).

Diese internationalen Entwicklungen sind von den Landesvermessungen bei den Initiativen der AdV zur Einführung eines neuen einheitlichen Raumbezugs für die BRD zu berücksichtigen. Die Grundnetzpunkte des neuen Raumbezugssystems der Landesvermessungen sind an das bundesweite GREF- und das europäische EPN anzuschließen. Die Nutzung einiger identischer Punkte in allen drei Referenznetzen ist dabei anzustreben.

6 Stationspezifische Einflüsse bei der Einrichtung von aktiven Raumbezugspunkten

Bei der Planung aktiver Raumbezugspunkte sind geologische, topographische, konstruktive und elektrotechnische Kriterien sowie ergänzenden Randbedingungen untereinander abzuwägen. Das Ziel ist, stationspezifische Fehlereinflüsse bereits in der Entwurfsphase zu minimieren. Ausgewählte Aspekte werden im folgenden anhand des Landesbezugssystems von Niedersachsen erläutert.

6.1 Geologische Standortbetrachtung

Bei der Auswahl von Referenzstationsstandorten sind die landesgeologischen Verhältnisse zu beachten, über die der Geologische Dienst des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) informiert (Abbildung 3). Anhand der Geologie muss über die Standortauswahl und die Art der Gründung entschieden werden. Standorte über Gaskavernen, Salzstöcken und Rohstoffabbaugebieten sind aufgrund der nachweisbaren Bodenbewegungen ebenso zu vermeiden wie über stark fluktuierenden Grundwasservorkommen.



Abbildung 3: Geologische Übersicht Niedersachsen (NLFB 2005)

Die für eine Langzeitstabilität anzustrebende Verankerung im Festgestein ist lediglich im südlichen Teil Niedersachsens möglich. Im mittleren und nördlichen Teil, dem niedersächsischen Tiefland, überwiegen dagegen eiszeitliche Ablagerungen mit einer Mächtigkeit von mehr als 50 m. Hier können ausreichend dimensionierte Einzelfundamente gegenüber den wesentlich aufwändigeren Tiefgründungen vorteilhafter sein, wenn die unvermeidbaren Setzungen z.B. durch Vorbelastungen berücksichtigt werden.

6.2 Topographische Standortbedingungen

Zu den wichtigsten topographischen Anforderungen eines Referenzstationsstandortes gehört die möglichst freie Satellitensichtbarkeit. Der Horizont sollte oberhalb eines Elevationswinkels von 3° bis maximal 5° frei von Hindernissen sein (Abbildung 4). Dazu gehören Bäume, Wohn- und Industriegebäude sowie Türme und Masten. Die Standorte dürfen auch nicht nachträglich durch Baumwuchs oder Neubebauung beeinträchtigt werden. Eine solche Änderung der Umgebungsbedingungen kann Positionsänderungen der GPS-Station verursachen.

Gegenüber potentiellen Reflektoren wie Flachdächern mit Lichtkuppeln, Garagen, Metallcontainern und Metallzäunen ist ein möglichst großer Abstand einzuhalten, um die Einflüsse der Mehrwegeausbreitung zu reduzieren. Die Nähe von Radio- und TV-Sendern, Mobilfunkbasisstationen, Amateurfunk- und Richtfunkstrecken, Überlandstromleitungen und RADAR-Anlagen ist zu meiden, um Signalinterferenzen auszuschließen.

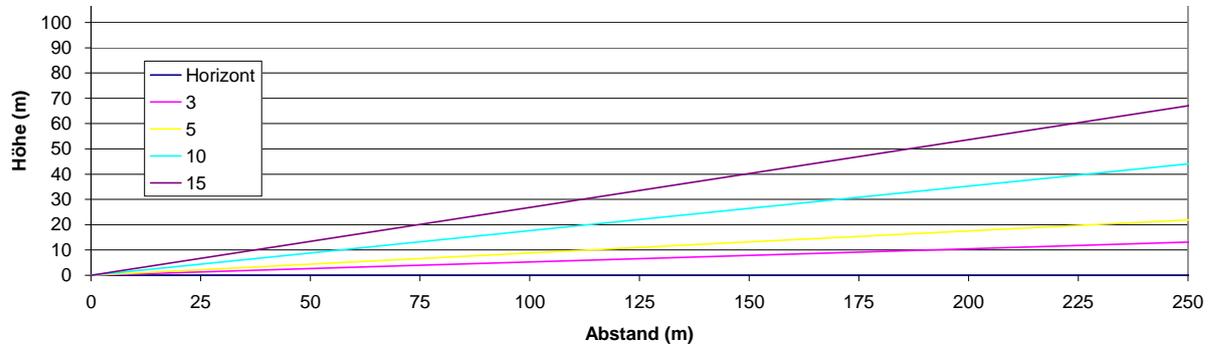


Abbildung 4: Zulässige Höhen von Hindernissen in Abhängigkeit vom Abstand zu einer boden gleichen Referenzstation

6.3 Konstruktive Anforderungen

Das Monument einer GPS-Station kann als klassischer Vermessungspfeiler aus Stahlbeton oder als turmartiges Bauwerk realisiert werden. Insbesondere wenn die GPS-Antenne zugunsten einer besseren Horizontfreiheit und Vermeidung von Mehrwegesignalen mehrere Meter hoch über dem Erdboden aufgestellt werden soll, bieten sich die von Strommasten und Windrädern bekannten Konstruktionen aus Vollprofilen oder Gitterfachwerken an. Bei diesen technischen Versorgungsbauwerken sind Neigung und Torsion in gewissen Grenzen zugelassen. Für die geodätische Nutzung ist dies jedoch nicht tolerierbar und die Konstruktion muss für eine wesentlich höhere Steifigkeit ausgelegt werden.

Die Bemessung turmartiger GPS-Monumente muss sich so an der statischen Belastung durch Temperaturdifferenzen orientieren, dass die Bewegung der GPS-Antenne maximal 2-3 mm beträgt. Mit Hilfe der Beobachtungen eines Neigungsmesssystems können größere Auslenkungen korrigiert werden. Es dient zugleich der Kontrolle einer Neigung des Fundamentes. Die dynamische Erregung durch Wind ist selbst für eine Echtzeitnutzung im allgemeinen unkritisch, da sie mehr als 1 Hz beträgt und durch Signalfilterung eliminiert werden kann. Eine Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) gibt letztendlich Aufschluss über die zur Erreichung der geforderten Steifigkeit notwendigen Dimensionierung der Konstruktion.

In der Entwurfsphase ist auch bereits die spätere Unterbringung des GPS-Empfängers sowie der Strom- und Datenkommunikationsanschlüsse zu berücksichtigen. Das Antennenkabel sollte möglichst kurz sein. Die gesamte Hardware muss diebstahlsicher untergebracht werden. Bei den turmartigen Stahlkonstruktionen ist der Zugang zur GPS-Antenne festzulegen und ein regelmäßiger Wartungsaufwand, z.B. zur Erneuerung des Korrosionsschutzes, einzuplanen.

6.4 Elektromagnetische Einflüsse

Die Empfangseigenschaften einer GPS-Antenne werden durch alles beeinflusst, was sich in deren Nähe befindet. Unter Berücksichtigung der Dämpfung dient jedes umgebende Material grundsätzlich als Leiter oder Reflektor für Mikrowellensignale. Deshalb müssen Antenne und Monument als Einheit, als voneinander abhängiges System, gesehen werden.

Die Umgebung einer Antenne kann in ein Nahfeld und ein Fernfeld eingeteilt werden (Abbildung 5). Nach Menge (2003) unterteilt sich das Nahfeld noch in eine reaktive Region in unmittelbarer Nähe des Antennenpatches sowie in eine strahlende Fresnel-Zone, die den Übergang zum Fernfeld darstellt. Zum Einwirkungsbereich des Nahfeldes zählen die Antenne mit Grundplatte und Radom, der Dreifuß mit Adapter und ein Teil des Monumentes.

Die Nahfeldeffekte resultieren zum einen aus der Signalstreuung (Reflexion, Diffraction) und zum anderen aus der wechselseitigen Induktion des elektrischen und des magnetischen Feldes um die Antenne. Die Effekte sind eine Funktion der Signalfrequenz, der Reflexionseigenschaften der im Nahfeld befindlichen Teile und des Elevationswinkels der Satelliten (Wübbena et al. 2003). Sie wirken sich als systematische, elevationsabhängige Fehler aus, die nicht mit der Zeit gegen den Erwartungswert Null konvergieren.

Bei der Antennenkalibrierung verfälschen die Nahfeldeffekte die Werte der Phasenzentrumsvariationen, weil sich die zur Antennenkalibrierung verwendete Adaption auf den Roboter von den Nahfeldbedingungen am Antennenstandort unterscheidet. Kann das Antenne-Monument-System daher nicht am Ort der Kalibrierung nachgebildet werden (Schmitz et al. 2004), ist im Prinzip eine in situ Kalibrierung erforderlich, die neben der Antennen- auch eine Stationskalibrierung einschließt.

Die elektromagnetischen Einflüsse im Nahfeld der GPS-Antenne haben als Teil der stationspezifischen Fehlerbetrachtungen größere Aufmerksamkeit erfahren (Johansson 1999). Unterschiedliche Antennenkonfigurationen aus Grundplatten, Choke-Rings und Radome werden in Reihenuntersuchungen kalibriert. Auch der Einfluss von Niederschlag und Schnee auf Antennen wird untersucht. Dagegen liegen noch keine Erkenntnisse über die optimale Materialauswahl, die Oberflächenform und die Abmessungen des Monumentes vor.

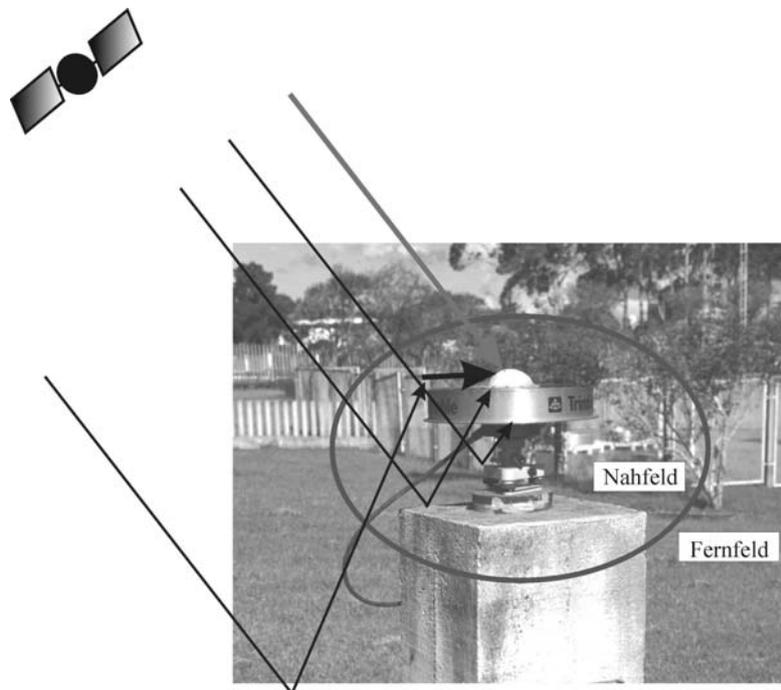


Abbildung 5: Signalstreuung im Nahfeld einer GPS-Antenne

6.5 Ergänzende Randbedingungen

Selbst in einem Flächenland wie Niedersachsen ist es schwierig, Standorte zu finden, die eine ausreichende Horizontfreiheit gewährleisten, über einen geeigneten Baugrund verfügen und den Belangen von Landwirtschaft sowie Landschafts- und Naturschutz nicht entgegenstehen. Baugenehmigungen im Außenbereich werden restriktiv gehandhabt, auch wenn es sich bei GPS-Referenzstationen vergleichbar zu öffentlichen Versorgungseinrichtungen um privilegierte Vorhaben nach § 35 BauGB handelt.

Entsprechend der langfristigen Zielsetzung der aktiven Raumbezugspunkte sind die eigentumsrechtlichen Verhältnisse an dem Standort vertraglich abzusichern. Die Erwerbs- oder Pachtkosten sind ebenso wie die Kosten für den Installations- und Unterhaltungsaufwand und die laufenden Kosten für die Stromversorgung und Datenkommunikation einzuplanen.

Jede einzelne Station stellt einen wichtigen Bestandteil des Referenznetzes und damit des Raumbezugssystems dar. Störungen müssen im Rahmen eines umfassenden Qualitätsmanagements frühzeitig erkannt und umgehend behoben werden.

7 Fazit und Ausblick

Die hohe Genauigkeit des GPS-Messverfahrens erlaubt es, moderne Raumbezugssysteme durch permanent messende, aktive GPS-Referenzstationsnetze zu realisieren und bereitzustellen. Begrenzt wird die Qualität der Referenzstationen u.a. durch stationsspezifische Fehlerinflüsse. Variationen des Antennenphasenzentrums werden durch Relativ- bzw. Absolutkalibrierungen weitgehend modelliert, es verbleiben jedoch noch ungeklärte systematische Effekte auf die Phasenzentrumsvariationen im elektromagnetischen Nah- und Fernfeld der Antenne. Die Nahfeldeffekte werden durch Form, Größe und Material des GPS-Monumentes einschließlich des Dreifußes, Adapters usw. bestimmt. Die Mehrwegeeffekte hängen dagegen von der Höhe der GPS-Antenne über dem Erdboden sowie den Abständen zu reflektierenden Flächen in der Stationsumgebung ab.

Damit hat das Design eines GPS-Monumentes ebenso einen Einfluss auf die Qualität einer Referenzstation wie dessen statische und dynamische Konstruktionseigenschaften. Für die Langzeitstabilität ist eine feste Verankerung im Untergrund entscheidend. Auch wenn das Design für das ganze Antennen-Monument-System letztendlich einem Kompromiss aus unterschiedlichen Anforderungen entspricht und für jeden Standort individuell entschieden werden muss, ist eine weitgehende Standardisierung anzustreben, um die vergleichbaren systematischen Fehler eliminieren zu können.

Die Vielfalt der beschriebenen Richtlinien und Praxisbeispiele zeigen, dass sich noch keine internationalen Standards für GPS-Monumente durchgesetzt haben. Für den Einsatz im Bezugssystem der Landesvermessung ist daher eine eigene Entwicklung auf der Grundlage der gezeigten Beispiele unvermeidbar. Dabei ist es zur Absicherung der langfristigen Investitionsentscheidungen ratsam, Sachverstand aus der Ingenieurgeologie bzw. dem Grundbau sowie der Statik und Dynamik hinzuzuziehen.

Der gegenwärtigen Stand des SAPOS-Monitorings lässt keine gesicherten Aussagen über die langfristige Stabilität der auf Gebäuden stehenden SAPOS-Stationen zu. Nach der Diagnoseausgleichung (Beckers et al. 2005) wurden die Stationskoordinaten in den Ländern nur teilweise homogenisiert, so dass sich Inkonsistenzen der Stationskoordinaten nicht immer von Bewegungen trennen lassen. Die angestrebte Qualitätssteigerung des SAPOS-Dienstes und

die Weiterentwicklung der GPS-Referenzstationen zu integrierten Raumbezugspunkten macht daher ein Redesign der Referenzstationen für die modernen Landesvermessungsaufgaben notwendig. Wenn GPS-Monumente unter Berücksichtigung der neuen Aspekte eingerichtet werden sollen, müssen diese bis zur für 2008 geplanten GPS-Messkampagne im Rahmen der DHHN92-Erneuerung funktionsfähig sein.

Literatur

- AdV (1998). Bericht der Expertengruppe GPS-Referenzstationen im Arbeitskreis Grundlagenvermessung. URL: <http://www.sapos.de>
- Beckers, H., Behnke, K., Derenbach, H., Faulhaber, U., Ihde, J., Irsen, W., Lotze, J., Strerath, M. (2005). Diagnoseausgleichung SAPOS® – Homogenisierung des Raumbezugs im System ETRS89 in Deutschland. ZfV 130: 203-208.
- Böder, V., F. Menge, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2001). How to Deal With Station Dependent Errors - New Developments of the Absolute Calibration of PCV and Phase-Multipath With a Precise Robot. ION GPS 2001, Salt Lake City, Utah.
- CSRS (2006). SCIGN GPS Site Monument Information. URL: <http://csrs.ucsd.edu/howTo/scignMonumentInfo.html>
- Dzurisin, D. (1999). USGS Yellowstone Continuous GPS Network. URL: http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/Yellowstone/Monitoring/GPSNetwork/yellowstone_gps_network.html
- Dilßner, F., G. Seeber, U. Feldmann-Westendorff, G. Wübbena, M. Schmitz, M. Bachmann (2004). Absolute Field Calibration of Carrier Phase Multipath. Poster presented at IGS Workshop & Symposium "Celebrating a Decade of the International GPS Service IGS", 1.-5. März 2004, Bern.
- EPN CB (2004). EUREF Permanent GPS Network (EPN) Guidelines. URL: http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/index.html
- Imakiire, T., Yuki Hatanaka, Yohta Kumaki, Atsusi Yamagiwa (2004). Geonet: Nationwide GPS Array of Japan. http://www.gisdevelopment.net/magazine/years/2004/mar/geonet_japan.shtml
- IGS CB (2004). IGS Site Guidelines. URL: <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.pdf>
- IGS CB (2006). Monumentation Design and Implementation Recommendations. Table 1: Considerations for Monumentation. Table 2: Types of monuments and examples of each. <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html>
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Luthardt, J., Liebsch, G., Kenyeres, A., Makinen, J., Shipman, S., Simek, J., Wilmes, H. (2005). The Implementation of the ECGN stations - Status of the 1st Call for participation. In preparation for EUREF Publication, Symposium Bratislava, June 2004. In: Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a.M. URL: http://gibs.bkg.bund.de/ecgn/docu/Paper_ECGN_EUREF_050701final.pdf
- Johansson, J.M. (1999). GPS Antenna and Site Effects. IAG Special Study Group 1.158 (1995-1999). http://www.gfy.ku.dk/~iag/Travaux_99/ssg1158.htm
- Lindner, K., Mayer, M., Kutterer, H., Heck, B. (2000). Die Vermarktung der Netzpunkte – eine Bestandsaufnahme. In: Dietrich, R., R. Dach, G. Engelhardt, J. Ihde, W. Korth, H. Kutterer, K. Lindner, M. Mayer, F. Menge, H. Müller, C. Müller, W. Niemeier, J. Perlt, M. Pohl, H. Salbach, H.-W. Schenke, T. Schöne, G. Seeber, A. Veit, C. Völksen: Ergebnisse der SCAR GPS Kampagnen - ITRF-Koordinaten und Geschwindigkeiten. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 310, München.
- Menge, F. (2003). Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 247.
- NGS (2005). Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS). National Geodetic Survey, National Ocean Survey, NOAA, Silver Spring, MD 20910. URL: http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/CORS_guidelines.pdf
- NLFB (2005). Erdgeschichte von Niedersachsen: Geologie und Landschaftsgeschichte. URL: <http://www.nlfb.de/>

- Schmidt, M., H. Dragert, W. Hill, N. Courtier (2001). New GPS Monument Design for Permanent GPS Installations in the Western Canada Deformation Array. URL: <http://www.pgc.nrcan.gc.ca/geodyn/docs/monument/content.html>
- Schmitz, M., G. Wübbena, G. Boettcher (2004). Near Field Effects of a Car Roof on TPSHIPER_PLUS Phase Variations. Geo++® White Paper, 06.12.2004, Garbsen.
- swisstopo (2006): Automatisches GPS Netz Schweiz AGNES. URL: <http://www.swisstopo.ch/de/basics/geo/permnetworks/agnes/>
- Timmen, L., O. Gitlein, G. Strykowski (2006). Absolute gravimetry in Denmark, Greenland and on Faeroer since 1986. Wissenschaftlich-technischer Report in der Schriftenreihe des National Danish Space Center (DNSC) (in Vorbereitung).
- UNAVCO (2006a). Permanent GPS stations. URL: http://facility.unavco.org/project_support/permanent/permanent.html
- UNAVCO (2006b). Übersicht der Monumente für GPS-Permanentstationen. URL: http://facility.unavco.org/project_support/permanent/monumentation/monument_table.html
- WALCORS (2006). WALCORS - Le réseau en détail. URL: <http://gps.wallonie.be/network.html>
- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher (2003). Zum Einfluss des Antennennahfeldes. In: B. Görres, J. Campbell, G. Seeber: 5. GPS-Antennen-Workshop 2003, 3. November 2003, Frankfurt/Main. URL: http://www.geopp.de/download/aws03_nah_pro_f.pdf