

Geodätische Bezugssysteme für Wirtschaft und Verwaltung

– Sachstand, Perspektiven, Zielmodelle –

Wolfgang Augath, Dresden

Gliederung

1	Vorbemerkung	2
2	Kenngroßen geodätischer Bezugssysteme im Wandel	2
2.1	Klassische Kenngrößen.....	2
2.2	Kenngrößen für Positionierungsdienste als Service	3
3	Stand und Trend im Lagefestpunktfeld	7
3.1	Probleme des erneuerten Lagefestpunktfeldes	7
3.2	Zielmodell I: „3D-Festpunktfeld“ mit RTK.....	12
3.3	Zielmodell II: HPPS.....	13
3.4	Trends im Lagebezugssystem in Deutschland und Europa.....	16
3.4.1	Moderne Lagenetze sind 3D-Netze.....	16
3.4.2	Von statischen zu kinematischen Netzen.....	17
3.4.3	Von der cm- zur mm-Genauigkeit.....	18
3.4.4	Neue Verfahrenslösungen entwickeln bzw. vervollkommen.....	19
3.4.5	Notwendigkeit der Einhaltung neuer Standards.....	20
4	Ausblick	22
5	Literatur	1

1 Vorbemerkung

Auch wenn die klassischen Kernaufgaben einer Landesvermessung weiterhin Bestand haben, so unterliegt ihre Ausführung einem ständigen Wandel. Er ist geprägt durch die technische Entwicklung, die es dem „Hersteller“ ermöglicht, die jeweiligen Anforderungen der Nutzer auf für beide Seiten wirtschaftliche und nachhaltig aussagefähige Weise zu erfüllen. In Niedersachsen ist die derzeitige Ausgangslage für die geodätischen Bezugssysteme in den §§ 5 und 6 des NVermKatG vom 23.11.1979 im Sinne einer erneuerten, aber klassischen Lösung mit analogen (=vermarkten) Festpunkten vorgegeben worden, die geplante Neufassung folgt nicht nur dem Gedanken der Verschlinkung von Vorschriften, sie eröffnet auch völlig neue Realisierungen dieser Kernaufgabe der Landesvermessung. Das Ziel dieses Beitrages besteht darin, ausgehend vom derzeitigen Stand Zielmodelle zu beschreiben und ihre Realisierung zu bewerten. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollen dabei auch europäische Entwicklungen mit einbezogen werden.

2 Kenngrößen geodätischer Bezugssysteme im Wandel

Alle geodätischen Bezugssysteme können mit Hilfe von Kenngrößen beschrieben werden. Die darin angegebenen Parameter beinhalten einmal *strategische Festsetzungen* des Herstellers, mit denen er seine Zielgruppen unter den Nutzern festlegt. Weiterhin wird die Vorgehensweise bei der *Realisierung* festgelegt. Den Abschluss bildet immer die Definition der *Schnittstelle zum Nutzer*. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen den klassischen Kenngrößen der analogen vermarkten Festpunktfelder und entsprechenden Parametern, die Positionierungsdienste mit Echtzeitanwendungen beschreiben.

2.1 Klassische Kenngrößen

In der Tab. 1 sind die wesentlichen klassischen Kenngrößen wiedergegeben worden, wie sie sich z.B. aus dem NVermKatG ergeben. Im Bereich der **strategischen Festsetzungen** kommt der Entscheidung über die Punktdichte die größte finanzielle Tragweite zu. Das angestrebte *geodätische Datum* und die *Genauigkeitsklasse* legen fest, welche Nutzergruppen angesprochen werden sollen. Bei der **Realisierung** wird über die *Art der Vermarkung* und den Grad der Sicherung der Festpunkte entschieden, ebenso wie über die verwendeten *Messverfahren* und deren Ausgestaltung einschließlich des Netzaufbaus und der Netzhierarchie. Die *Schnittstelle zum Nutzer* stellen die örtlichen Marken und der über sie *geführte Nachweis* (Übersicht, Punktbeschreibung, Punktdatei) dar.

Punktdichte Genauigkeitsklasse Geodätisches Datum	⇒ Strategische Festsetzungen
Vermarkung/ Sicherung Messverfahren	⇒ Realisierung
Marken Nachweis	⇒ Schnittstelle zum Nutzer

Tab.1: Klassische Kenngrößen geodätischer Bezugssysteme

2.2 Kenngrößen für Positionierungsdienste als Service

Will man die heutigen Positionierungsdienste beschreiben, so kann man zwar die Struktur der Kenngrößen beibehalten. Ihre Inhalte werden jedoch deutlich komplexer. Das liegt einmal an der Integration der Echtzeitfähigkeit, die erweiterbare Kenngrößen erforderlich macht, als auch an der Berücksichtigung komplexer Strukturen der Dienste einschließlich der Aufteilung in Teilleistungen. In der Tab. 2 ist der Versuch unternommen worden, die hierbei wesentlichen Parameter zusammenzutragen.

Garantien (Beginn/ Dauer/ Ausdehnung) Verfügbarkeitsklasse Genauigkeitsklasse Monitoringkonzept	⇒ Strategische Festsetzungen
Genauigkeit Verfügbarkeit Kontinuität Integrität Time to Alarm	⇒ Realisierung
Internationale Datenformate Kommunikationslösung Endgeräte	⇒ Schnittstelle zum Nutzer

Tab.2: Kenngrößen für Positionierungsdienste als Service

Bei den **strategischen Festsetzungen** kommt der Kenngröße „Garantien“ eine zentrale Bedeutung zu. Sie beinhaltet die verbindliche Aussage über Beginn und Dauer der Aufrechterhaltung des Dienstes sowie über die dabei versorgte Fläche. Bei den klassisch definierten geodätischen Bezugssystemen waren derartige Garantien nicht vorhanden, es gab nur Zielvorstellungen. Auch müssen die Garantien **alle** Komponenten des Dienstes umfassen, also bei einem DGPS-

Dienst auch die Garantie über die GPS-Komponente. Hinzu kommt weiterhin die *Genauigkeitsklasse* und die angestrebte *Verfügbarkeit* für den Nutzer. Hier muss z.B. die Kommunikationsmethode und die eingesetzte Sensorik festgelegt werden (z.B. Inhouse-Verfügbarkeit: ja = Einsatz von GPS + LORAN-C).

Bei der **Realisierung** verbleibt zwar die *Genauigkeit* als wesentliche Kenngröße, es kommen jedoch einige Parameter hinzu, die die Echtzeitfähigkeit beschreiben sollen und vorrangig für die Navigation in der Luftfahrt entwickelt worden sind. Die in Tab. 3 zusammengestellten Definitionen sind dem Deutschen Funknavigationsplan (DFNP 1999) entnommen worden. Das hier

Genauigkeit:	Abweichung vom wahren Wert, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % nicht überschritten wird ($= 2\sigma$)
Verfügbarkeit:	Wahrscheinlichkeit, ein System im funktionsfähigen Zustand vorzufinden (\rightarrow Systemverfügbarkeit) aber auch: „ lokale Verfügbarkeit “ beachten (Abschattungen, Störungen)
Kontinuität:	Wahrscheinlichkeit, dass ein System an einem Ort während einer vorgesehenen Nutzungsdauer nicht ausfällt.
Integrität (hier als integrity risk):	Wahrscheinlichkeit, dass eine Überschreitung des maximal zulässigen Fehlers nicht bemerkt wird.
Time to Alarm:	Zeitdauer zwischen dem Auftreten einer Grenzwertüberschreitung und der Bekanntgabe an den Nutzer

Tab.3: Definitionen von Kenngrößen zur Beschreibung eines Dienstes in der Navigation nach DNFP (1999)

der Genauigkeitsdefinition zugrunde gelegte Wahrscheinlichkeitsniveau liegt bei 95 % und entspricht somit etwa der doppelten Standardabweichung. Die Verfügbarkeitsdefinition beschreibt die Gesamtverfügbarkeit des Dienstes mit all seinen Komponenten. Bei einem DGPS-Dienst wäre das die GPS-Verfügbarkeit (min. 4 Satelliten), die Verfügbarkeit der Korrekturinfrastruktur einschließlich der Kommunikation zum Nutzer sowie eine „lokale“ Verfügbarkeit, die die Einschränkungen durch Interferenzen oder Signalstörungen beschreibt. Die Gesamtverfügbarkeit kann nie besser sein als die GPS-Verfügbarkeit, für die statistische Angaben des Amtes für Militärisches Geowesen für das Jahr 2000 vorliegen [vgl. Tab. 4 (Müller 2001)]. Die dort ermittelten Parameter sind für statische geodätische Anwendungen sicherlich ausreichend, für sensible Echtzeitanwendungen wie z.B. in der Luftfahrt jedoch nicht akzeptabel.

		GPS Verfügbarkeit 2000											
		<u>Summe aller Satellitenausfallzeiten</u>											
		Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
[Std]		195,5	137,5	827,2	626,0	72,1	164,7	894,5	1180,2	864,2	449,4	38,4	108,9
[%]		0,9	0,7	4,0	3,1	0,4	0,8	4,3	5,7	4,3	2,2	0,2	0,5
		<u>Verfügbarkeit des Gesamtsystems*</u>											
Ausfallzeiten [Std]		4,5	3,0	6,0	5,2	11,7	4,5	4,8	5,7	6,5	8,5	2,3	4,8
Verfügbarkeit [%]		99,40	99,57	99,19	99,28	98,43	99,38	99,35	99,24	99,10	98,86	99,68	99,35
		* Kriterium: Zeiten mit weltweit mindestens 4 sichtbaren Satelliten bei einer Elevationsgrenze von 15°											

Tab.4: Verfügbarkeit des GPS-Systems nach Müller (2001)

Alle diese Leistungsparameter müssen über eine *Monitoringinfrastruktur* überwacht werden, um bei Überschreitungen der Grenzwerte *Warnungen* aussprechen zu können. Die Größe „Time to Alarm“ beschreibt hier die Leistungsstärke eines Dienstes für Echtzeitnutzer.

Die Schnittstelle zum Nutzer wird über die Endgeräte hergestellt, die eine Kommunikationslösung und ein internationales Datenformat verarbeiten können. Die Leistungsfähigkeit eines Endgerätes entscheidet oftmals über den Erfolg eines Dienstes. Es ist deshalb unbedingt zu empfehlen, dass

- das Einsatzgebiet des Dienstes groß genug ist,
- die Garantien für Beginn und Laufzeit vorliegen,
- falls vorhanden, internationale Datenformate verwendet werden,

um die Industrie zum Endgerätebau zu motivieren.

Auf überzeugende Weise, allerdings verbunden mit einem hohen finanziellen Aufwand, sind diese Prinzipien bei dem europäischen GNSS-1-Dienst EGNOS (European Global Navigation Overlay Service) der European Space Agency (ESA) verwirklicht worden. Bei EGNOS werden GPS und GLONASS als Weltraumbasissegmente genutzt. Die weltraumgestützte Erweiterung (SBAS) besteht im Endausbau aus drei geostationären Satelliten in 36.000 km Höhe über dem Äquator. Die geostationären Satelliten übernehmen

Kommunikationsaufgaben für die Übertragung von Differentialkorrekturen und von Integritätsaussagen [hier nur: Nutzung des Systems möglich? (Ja/Nein)].

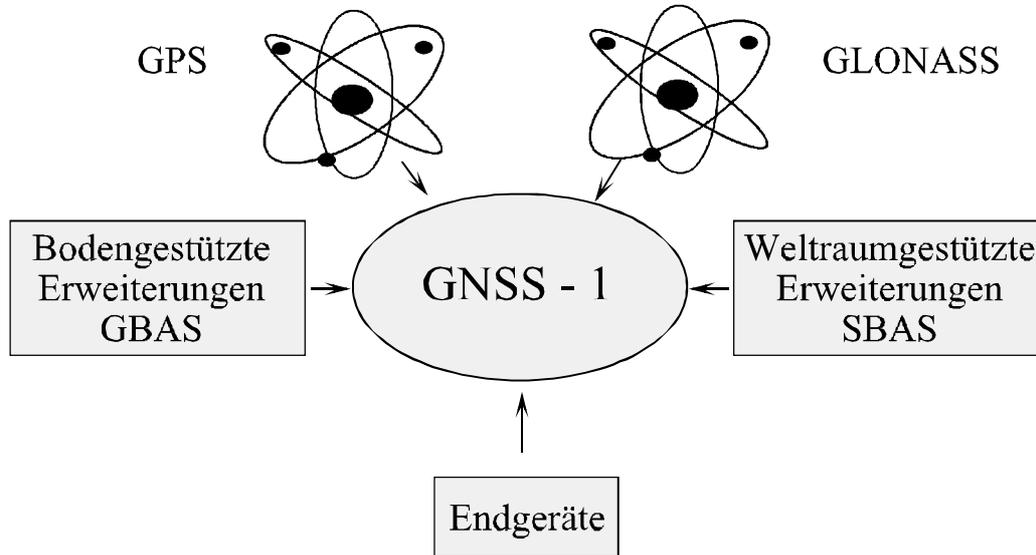


Abb. 1: Komponenten eines globalen Navigationssatellitensystems der Stufe 1 (GNSS-1)

Zusätzlich werden zur Verbesserung der Verfügbarkeit GPS-ähnliche Pseudostreckensignale ausgesandt. Die Zeit bis zu einem Alarm beträgt 6 s und erfüllt damit die Anforderungen der Luftfahrt für den Streckenflug (10 s) und für den Landeanflug der Kategorie I (6 s).

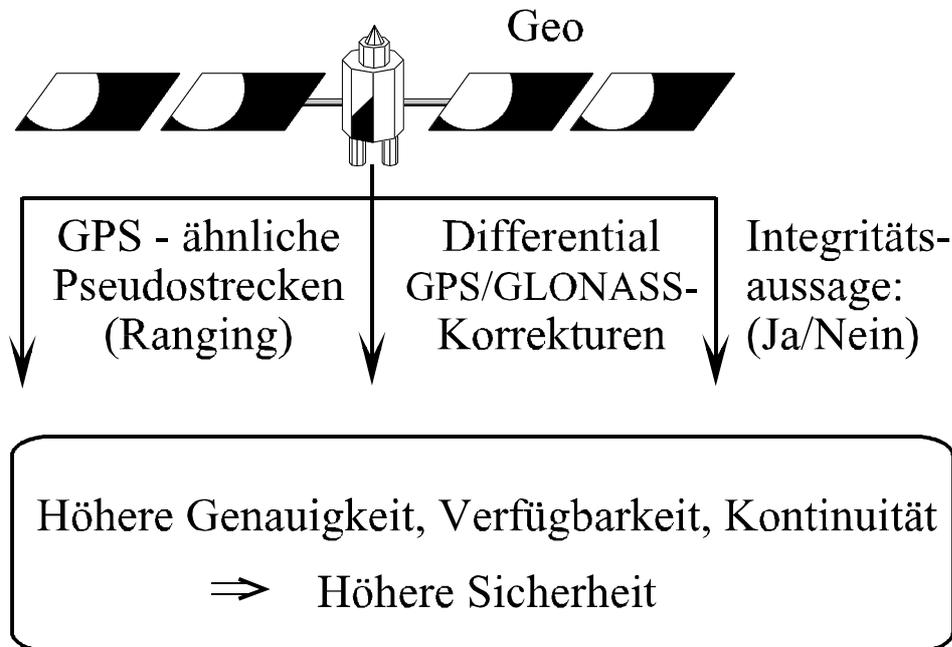
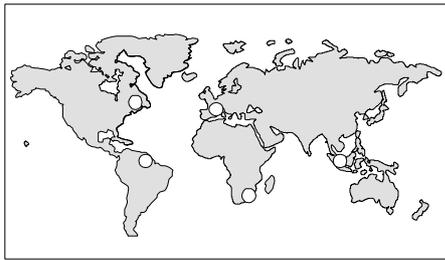
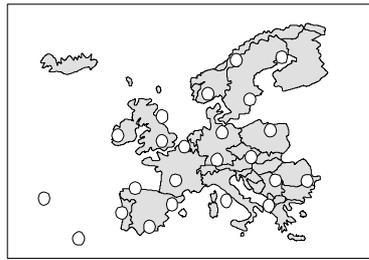


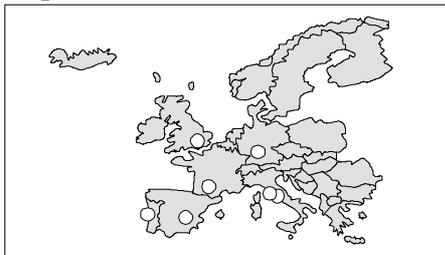
Abbildung 2: Bestandteile und Leistungen des EGNOS-Weltraumsegmentes (SBAS)



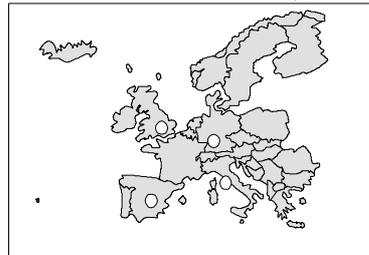
Trackingstationen der
geostationären Satelliten



Regional verteilte
Monitorstationen (RIMS)



Kommunikationszentralen
(NLES)



Masterkontrollzentren
(MCC)

Abbildung 3: Bestandteile des EGNOS-Bodensegmentes (GBAS)

Die Abbildungen 2 und 3 geben die Bestandteile des EGNOS-Weltraumsegmentes (SBAS) und des Bodensegmentes (GBAS) wieder. Die darin enthaltenen Monitorstationen ermitteln regional GPS/ GLONASS-Korrekturdaten und überwachen gleichzeitig das Gesamtsystem. Eine Kooperation mit dem EUREF-Permanentnetz oder gar mit SAPOS ist nicht vorgesehen. Die leistungsstarke Kommunikation zwischen den Stationen und zum Masterkontrollzentrum (MCC) ermöglicht die kurze Alarmzeit. Auch der Endgerätebau wird von der ESA gezielt gefördert.

3 Stand und Trend im Lagefestpunktfeld

3.1 Probleme des erneuerten Lagefestpunktfeldes

Insgesamt lassen sich in Niedersachsen drei Entwicklungsstufen ausmachen, die sich noch heute in der Punktdaten wiederfinden und deren Kenngrößen in der Tabelle 5 zusammengetragen worden sind.

- A: Klassisches Lagefestpunktfeld (LS 200, Preußische Landesaufnahme 1875)
- B: Erneutes klassisches Lagefestpunktfeld (LS 100: Netzerneuerung 1972 – 1996)
- C: 3D-Festpunktfeld (LS 389: ETRS/ ETRF 89)

Insgesamt handelt es sich um analoge (vermarkte) Festpunktfelder,

Name	LS 200 Pr. Landesaufnahme	LS 100 erneuert	LS 389 3D-Netz
Datum	Rauenberg (nationales Datum)	Rauenberg (homogenisiert für Nds.)	Globales Datum ITRS → ETRS
Genauigkeit	A, B < 10 cm	1 cm/ 1-2 km	1 cm weltweit
Punktdichte	TP, PP, KP	TP, AP: ca. 4 pro km ²	nicht festgelegt (bislang ca. 50 km ² pro Punkt)

Tab. 5: Lage- bzw. 3D-Bezugssysteme in Niedersachsen

deren stichwortartige Kurzbeschreibung den technischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte widerspiegelt. So hat sich das geodätische Datum von der klassischen (= astronomischen) Lösung zu einem globalen Datum basierend auf den Messverfahren VLBI, SLR und GPS weiterentwickelt. Die bei der Festsetzung der Koordinaten im Lagestatus (LS) 100 seinerzeit nicht vorhanden gewesene Endgültigkeit liegt somit heutzutage vor. Ein globales Datum mit Realisierungen mit Zentimetergenauigkeit macht es allerdings erforderlich, die komplexe Wirklichkeit der Figur der Erde auf ein wohldefiniertes Modell zurückzuführen, das International Terrestrial Reference System (ITRS), mit festgesetzten Definitionen und Größen, wie

- erdfestes geozentrisches Koordinatensystem mit einem Referenzpol (C IO) als z-Achse und der Festlegung der x-Achse (Meridian von Greenwich/ Äquatorebene)
- Masse m der Erde, enthält auch die Ozeane und die Atmosphäre
- Winkelgeschwindigkeit ω der Erde
- große Halbachse eines Referenzellipsoides
- dynamische Abplattung

Hinzu kommen weitere Spezifikationen wie sie in der Technical Note No. 21 des Internationalen Erdrotationsdienstes (IERS 1996) festgelegt worden sind. Da sich die Zahlenwerte dieser Größen ändern können, ist es erforderlich, eine Jahreszahl hinzuzufügen. Der Übergang von der Wirklichkeit mit ihren veränderlichen Anteilen, wie Schwankungen des Referenzpols oder Deformationen der Erde durch die Massenanziehung des Mondes und anderer

Gestirne, ist mit einheitlichen Reduktionen vorzunehmen. Hinzu kommen die Korrekturen der Messverfahren. Alle anderen Änderungen sind in den Realisierungen des ITRS_{xx} durch zeitabhängige Koordinaten zu erfassen [International Terrestrial Reference **Frame** (ITRF_{xx})].

Die europäische Vereinbarung des ETRS 89/ ETRF 89 ist weiterhin eine globale Lösung, es wurde nur der Zustand des Jahres 1.1.1989 durch Übernahme der damaligen Koordinaten des ITRS 89/ ITRF 89 festgehalten und damit eine Regelung geschaffen, mit der die praktische Landesvermessung und ihre Nutzer arbeiten können. Die Erde verändert sich weiter, derzeit wird am ITRF 2000 gearbeitet. Für den Übergang von späteren Zeitpunkten auf die Epoche 1989 liegen Transformationsparameter vor (Boucher und Altamini 1995), die von der EUREF-Kommission beschlossen wurden und mit deren Hilfe spätere Messungen in die Referenzepoche transformiert werden können (oder umgekehrt). Da der größte Teil Europas auf der in sich stabilen (?) eurasischen Platte liegt, kann bei den meisten praktischen Arbeiten auf diese Transformationen verzichtet werden. Es ist nur zu prüfen, ob die aktuellen Bahndaten der Satelliten, die sich auf neuere Epochen des ITRF beziehen, für die spezielle Aufgabe noch hinreichend genau sind. Die oft benutzte Vorstellung, dass das „Koordinatensystem des ETRS 89 mit der eurasischen Platte mitschwimmt“, ist zwar bildlich hilfreich, (z.B. Tegeler 2001), die Mathematik kinematischer Systeme ist aber nur über zeitliche Transformationen zu lösen.

Wie einfach war das Leben doch mit den klassischen nationalen Datumsfestsetzungen begrenzter Ausdehnung, die neben den Ellipsoidparametern nur die astronomischen Koordinaten des Fundamentalpunktes und ein Azimut enthielten!

Die in der Tab. 5 unterstellte globale Einzentimetergenauigkeit ist heutzutage sicherlich gegeben, im Jahr 1989 jedoch noch nicht (vergl. Tab. 6). Die Auswirkungen sind jedoch durch die Koordinierung des DREF 91 mit Hilfe der EUREF D/NL-Kampagne des Jahres 1993 (Seeger 1997) für ein Land wie Niedersachsen minimiert worden.



GPS STATION	KOORDINATEN ITRF93 EPOCHE 1993			DIFF:(ITRF97-ITRF93)			LAGEGESCHWINDIGKEIT		
X[m]	Y[m]	Z[m]	dN[m]	dE[m]	dU[m]	cm/a	RICHTUNG [°]		
ONSA	3370658.716	711876.978	5349786.830	0.0446	0.0615	0.0142	2,0	35,9	
GRAZ	4194424.034	1162702.490	4647245.279	0.0580	0.0843	0.0007	2,5	35,5	
JOZE	3664940.397	1409153.696	5009571.293	0.0464	0.0746	-0.0158	2,0	31,9	
KOSG	3899225.304	396731.761	5015078.300	0.0583	0.0623	0.0117	2,0	43,1	
ZIMM	4331297.241	567555.673	4633133.799	0.0527	0.0716	0.0110	2,0	36,4	
WTZR	4075578.643	931852.624	4801569.995	0.0547	0.0735	0.0042	2,3	36,6	

VLBI/SLR STATION	KOORDINATEN ITRF89 EPOCHE 1989			DIFF:(ITRF97-ITRF89)			LAGEGESCHWINDIGKEIT		
X[m]	Y[m]	Z[m]	dN[m]	dE[m]	dU[m]	cm/a	RICHTUNG [°]		
ONSA	3370606.189	711917.453	5349830.622	0,1525	0,0703	-0,0109	2,1	65,3	
GRAZ	4194426.720	1162693.899	4647246.558	0,1616	0,1866	-0,0398	3,1	40,9	
BORO	3738332.893	1148246.155	5021815.814	0,0853	0.3423	0,1983	4,4	B,9	
KOSG	3899224.119	396742.882	5015073.880	0,0934	0.1486	0,1073	2,2	32,2	
ZIMM	4331283.617	567549.563	4633139.956	0,1384	0.1737	0,0321	2,7	38,5	
POTS	3800621.319	882005.371	5028859.531	0,1365	0.1523	-0,0862	2,7	41,9	
WTZR	4075582.633	931837.255	4801559.852	0,1825	0.1164	-0,0322	2,7	57,5	

Tab. 6: Koordinatenänderungen im ITRF 89-97 einiger europäischer Fundamentalpunkte

Der Übergang vom Bezugssystem „LS 100“ auf „LS 389“ ergibt sich allerdings nicht aus Genauigkeitsproblemen, da die Nachbarschaftsgenauigkeit nicht gesteigert wird. Das Konzept des erneuerten Lagefestpunktfeldes (dichtes AP-Netz, Sicherung und Überprüfung der Festpunkte vor jeder Benutzung) ist zwar weiterhin wohl durchdacht, es verursacht jedoch nach den inzwischen vorliegenden Erfahrungen hohe Kosten, die durch Ausnutzung des Potentials satellitengestützter Verfahren deutlich reduziert werden können. In Tab. 7 sind die Herstellungskosten für die Bestimmung von Lagefestpunkten mit der Unterteilung in Vermarktung/ Sicherung, Messung und Berechnung zusammengestellt worden.

	TP	AP
Vermarktung	600 DM	300 DM
Sicherung		
Messungen	trad.: 2000 DM	150 DM
	GPS (1991) 400 DM	100 - 400 DM
Berechnungen/ Datenbank	300 DM	150 DM
	Σ 1.300 DM	Σ 600 DM

Tab. 7: Herstellungskosten für TP und AP nach Augath (1993)

Sie macht die hohe Einsparung im TP-Bereich durch die Verwendung satellitengestützter Verfahren deutlich. Sie zeigt aber auch, dass heutzutage der Anteil „Vermarktung/ Sicherung“ den Hauptkostenblock ausmacht, der nur durch eine Reduzierung der notwendigen Zahl der Festpunkte minimiert werden kann. In Tab. 8 sind die Gesamtkosten für Herstellung, Erhaltung und Benutzung der Lagefestpunkte zusammengetragen worden, um auch hier den derzeit anfallenden Aufwand für alle Beteiligten am Lagefestpunktfeld deutlich zu machen. Es lohnte sich deshalb seinerzeit, neue Zielmodelle für das Lagefestpunktfeld aufzustellen.

	TP	AP
Einrichtung	30 Mill. DM	150 Mill. DM
Erhaltung	0,5 – 1 Mill. DM/ Jahr	-- (keine system. Erhaltung)
Benutzung	~ 0,5 h/ Punkt	~ 0,25 h/ Punkt oder 1 – 2h (Wiederherstellung)

Tab.8: Gesamtkosten im Lagefestpunktfeld nach Augath (1993)

3.2 Zielmodell I: „3D-Festpunktfeld“ mit RTK

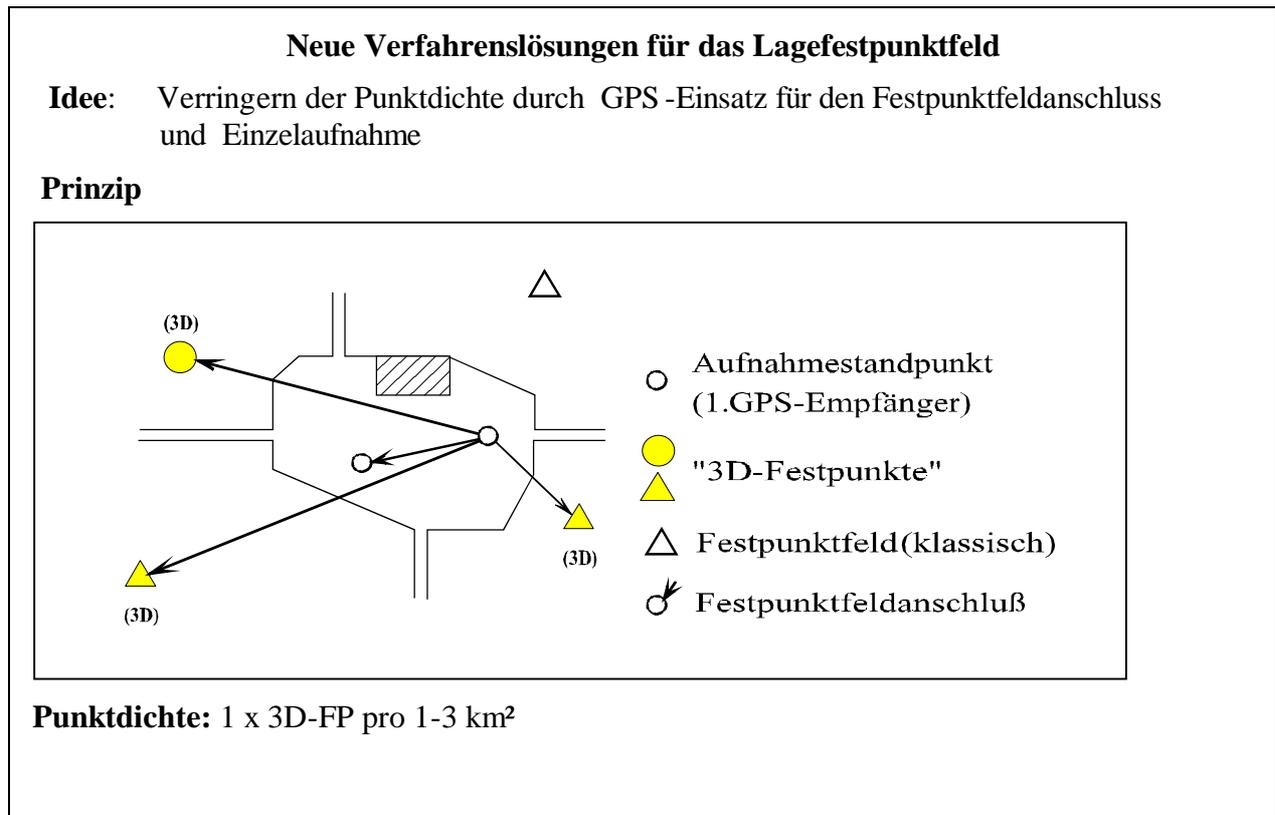


Abb. 4: Konzept des 3D-Festpunktfeldes nach Augath (1993)

Das Konzept eines „3D-Festpunktfeldes“ ist in Abb. 4 vereinfachend dargestellt worden, die Umsetzung liegt in Niedersachsen vor (z.B. Draken 1996). Letztlich wird die im Lagefestpunktfeld erprobte DGPS -Eigenschaft, fast entfernungsunabhängig und ohne gegenseitige Sichtverbindung mit hoher Genauigkeit Koordinatenunterschiede bestimmen zu können, für den Festpunktfeldanschluss bei der Liegenschaftsvermessung eingesetzt. Danach können auch weitere GPS-taugliche Punkte des Liegenschaftskatasters bestimmt werden. Die Analogie zur freien Stationierung und anschließender Polaraufnahme in der elektronische Tachymetrie ist offenkundig, nur sind die technischen Möglichkeiten gestiegen.

Es wird allerdings weiterhin ein vermarktes Festpunktfeld benötigt, dessen Stationen im Gegensatz zu denen des erneuerten Lagefestpunktfeldes (LS 100) auch GPS-tauglich sein müssen (deshalb der Namensvorschlag 3D - Festpunktfeld). Die erforderliche Punktdichte hängt allein davon ab, welche Fahrzeiten man dem Nutzer zumuten will. Unter niedersächsischen Voraussetzungen bietet es sich an, von den vorhandenen Festpunkten einfach die zu selektieren, die GPS-tauglich sind. Mit diesem Zielmodell lassen sich auf jeden Fall schon viele Festpunkte einsparen, es ist seit Jahren einsetzbar. Mit der inzwischen recht ausgereiften RTK-Technologie lassen sich auch Absteckungen

vornehmen und die Zeit für die Initialisierung ist dank leistungsfähiger Algorithmen deutlich kürzer als bei statischen Positionierungen. Es werden allerdings 5 und mehr Satelliten in guter Konfiguration benötigt, eine Forderung, die in abgeschatteten Gebieten trotz des inzwischen erweiterten GPS - Weltraumsegmentes Einschränkungen mit sich bringt. Die bei der Positionierung entstehenden Basislinien sind kurz und ermöglichen so eine einfache GPS-Fehlermodellierung. Auch die Transformationen von ETRS 89 in die lokale Realisierung des Bezugssystem des Liegenschaftskatasters ist unproblematisch, da sie sich im Entfernungsbereich der LS 100 -Spezifikation (1 cm für $s < \text{einige Kilometer}$) bewegt. Für den Nutzer verbleibt allerdings eine hohe Investition für die RTK-Ausrüstung, mit zwei GPS-Empfängern, die sich nur bei ständigem Einsatz über mehrere Jahre auf geringe Tageskosten reduzieren lässt.

3.3 Zielmodell II: HPPS

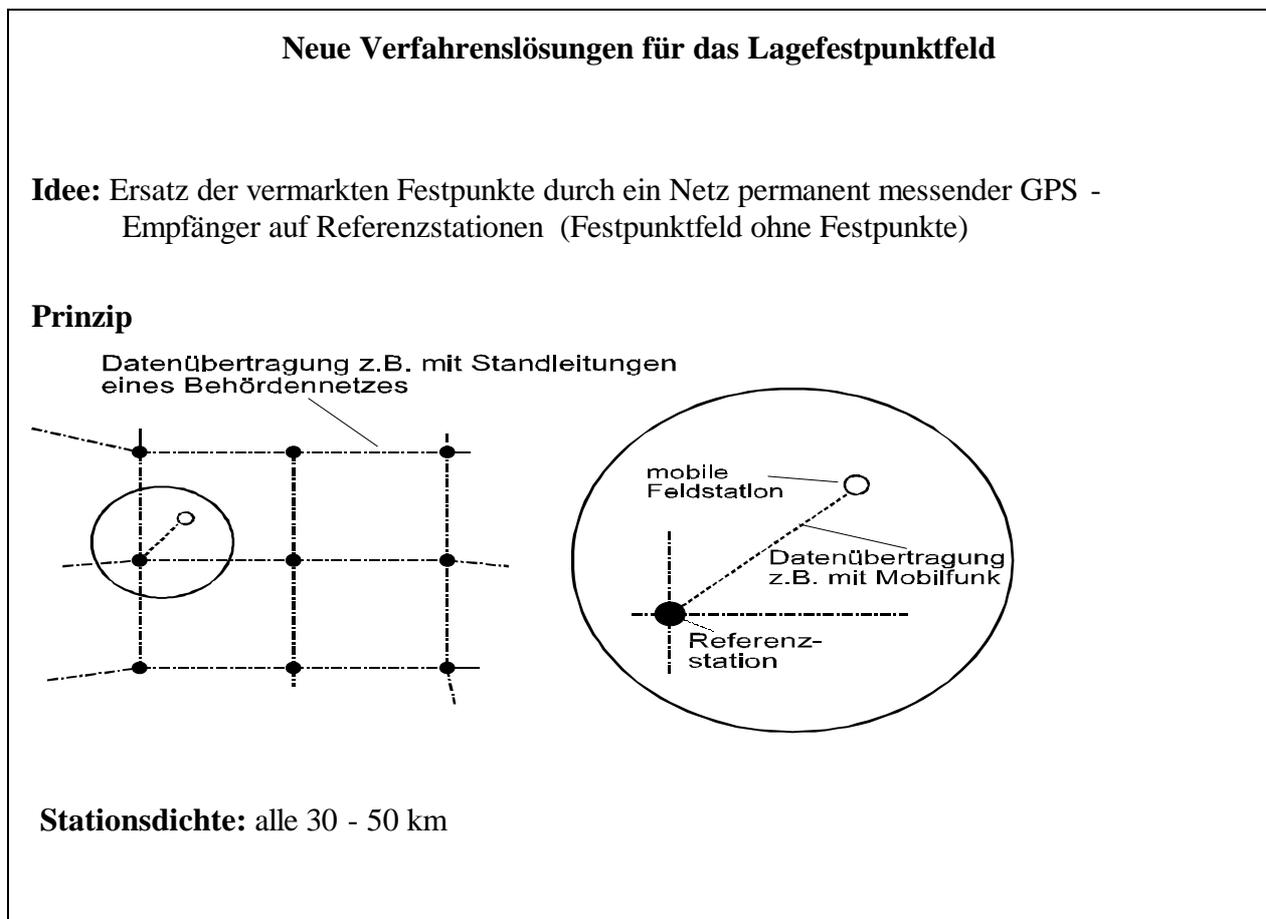


Abb. 5: Konzept eines satellitengestützten Positionierungsdienstes nach Augath (1993)

Eine Weiterentwicklung bildet das in Abb. 5 dargestellte Konzept eines hochpräzisen satellitengestützten Positionierungsdienstes (HPPS) dar. Hier wird ein vermarktes Festpunktfeld vollständig durch ein Netz permanent messender

GPS-Empfänger auf Referenzstationen ersetzt. Ein Nutzer positioniert sich in Bezug auf dieses Netz mit **einem** GPS-Empfänger. Er hat keine örtlichen Überprüfungen seiner Anschlusspunkte mehr vorzunehmen. Für die Landesvermessung entfallen alle Herstellungs- und Erhaltungskosten lt. Tab. 8. Sollen nur „temporäre Aufnahmepunkte (tAP)“ für eine Aufnahme bestimmt werden, gestaltet sich die Kommunikation sehr einfach (Übernahme der Referenzstationsdaten im Büro). Für Positionierungen in „Near-Realtime“, bei der bereits im Feld nach etwa 0,5 h Koordinaten erzeugt werden sollen (SAPOS - GPPS-Dienst) oder gar in Echtzeit (SAPOS -HEPS-Dienst), sind Kommunikationslösungen zwischen den Referenzstationen einerseits und zum Nutzer im Feld andererseits erforderlich. Es darf aber nicht übersehen werden, dass bei diesem Zielmodell Basislinien bis zu 30 km Länge entstehen können. Die dabei notwendige GPS-Fehlermodellierung ist komplexer als bei RTK - Einsätzen. Auch gestaltet sich der Übergang zwischen ETRS 89-Koordinaten und den Koordinaten der lokalen Realisierung des LS 100 aufwendiger, da dessen Homogenität in diesem Entfernungsbereich nicht mehr automatisch im Einzentimeterbereich liegt.

Mit der Verfahrensentwicklung für dieses Zielmodell wurde in Niedersachsen recht frühzeitig begonnen. Die Industrie interessierte sich anfangs wenig für diese Lösung. Deshalb war es sehr hilfreich, dass es im Rahmen des DGPS - Demonstrationsvorhabens des BMBF ab 1992 gefördert wurde. Im Abschnitt HPPS I wurde als Schwerpunkt die Gestaltung der Permanentstationen sowie die Frage ihres optimalen Abstandes für die Anforderung „Lagekoordinaten - genauigkeit $\leq 1\text{cm}$ innerhalb einer halben Stunde“ untersucht (Fröhlich 1997), während in HPPS II präoperationelle Fragen im Vordergrund standen, die zusammen mit dem Institut für Flugführung der TU Braunschweig (Schwerpunkt Kommunikation) und dem Geodätischen Institut der TU Dresden (Schwerpunkt Fehlermodellierung) bearbeitet wurden (Jahn 2000).

Inzwischen liegen auch mehrere Softwarevarianten vor, die als gemeinsame Kernidee die besonderen Verhältnisse in Permanentstations **netzen** (Koordinaten hochpräzise bekannt, Mehrdeutigkeiten vorab lösbar) zu einer flächenhaften Fehlermodellierung der entfernungsabhängigen Anteile nutzen, wie es in Abb. 6 beschrieben worden ist. Um dabei unabhängig von Uhrenfehlern zu, geschieht dies pro Satellit auf der Basis von „doppelten Differenzen (DD)“.

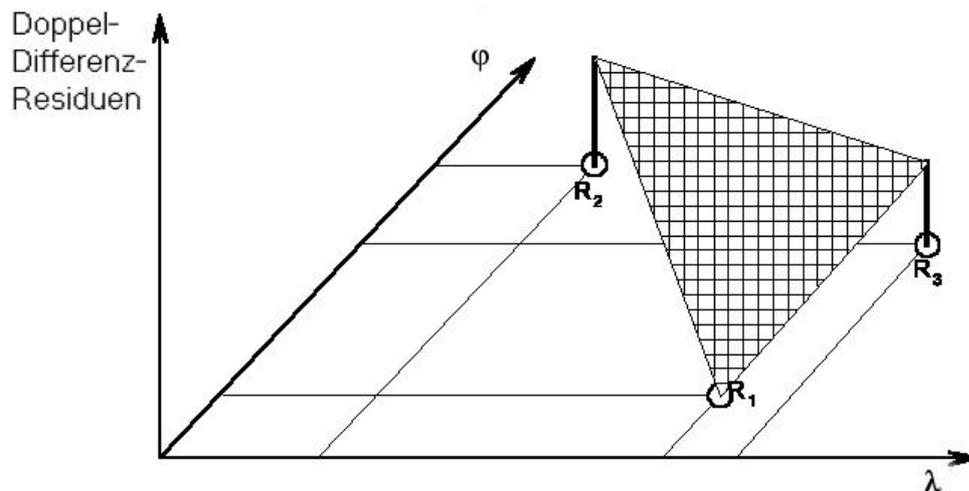


Abb. 6: Prinzip der flächenhaften Fehlermodellierung in Permanentstationsnetzen (Vernetzung)

L. Wanninger hat hier im Rahmen seiner an der TU Dresden entwickelten Software WaSoft (Wanninger 1999) eine Lösung vorgelegt, die für Post-processing- oder „Near-Realtime“-Konzepte zur Bestimmung von tAP ausgelegt ist. Hier wird dem Nutzer aus den Messwerten der umliegenden Permanentstationen eine RINEX-Datei für ein sog. virtuelle Referenzstation in der Nähe des Neupunktes erzeugt, mit deren Hilfe dann noch die fehlende kurze Basislinie zum Neupunkt berechnet werden kann. Hierzu reichen 5 min - Beobachtungsblöcke aus, um die Lagekomponenten des Neupunktes mit cm - Genauigkeit und besser zu bestimmen. Diese Vorgehensweise dauert zwar für die Einzelaufnahme zu lange, sie hat jedoch dank der größeren Datenbasis gegenüber den Echtzeitlösungen den Vorteil einer höheren Zuverlässigkeit.

Der SAPOS-HEPS-Dienst bietet eine Echtzeitlösung an, die dann notgedrungen für die einzelne Messepoche von geringer Genauigkeit sein muss, da die flächenhafte Fehlermodellierung hierbei stärker von zeitlich begrenzten Effekten beeinflusst sein kann. Aus den in Abb. 6 dargestellten Größen werden pro Satellit Flächenkorrekturparameter erzeugt und an den Nutzer übertragen, der damit seine gemessenen Werte korrigieren kann. Da hier in Echtzeit und mit extrem kurzen Beobachtungszeiten gearbeitet werden kann, eignet sich dieser Dienst auch für die Einzelaufnahme. Die geringere Genauigkeit ist hierbei kein Problem, so lange z.B. für die Liegenschaftsvermessung die bestehenden Spezifikationen eingehalten werden. C.H. Jahn (2001) hat aus niedersächsischen Daten einer Monitorstation die Abb. 7 erzeugt, die die Variationen der Koordinaten während eines Tages wiedergeben.

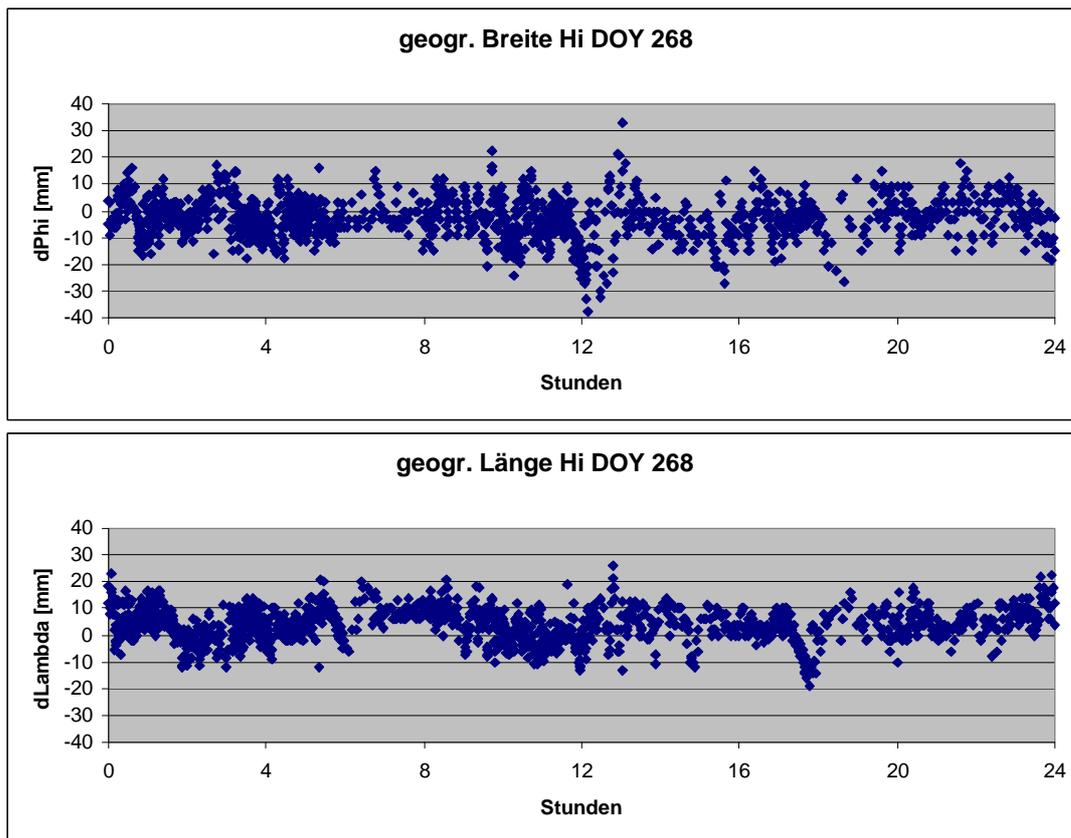


Abb. 7: Variationen der Koordinaten einer Monitorstation in Südniedersachsen nach Jahn (2001)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die notwendige Software für SAPOS - HEPS- und SAPOS-GPPS-Dienste inzwischen zur Verfügung steht und eine landesweite Einführung vorgenommen werden kann.

3.4 Trends im Lagebezugssystem in Deutschland und Europa

Die Entwicklung der letzten Jahre erlaubt die Ableitung von allgemeinen Trends. Hierbei ist nicht nur Deutschland, sondern mindestens auch Europa zu betrachten.

3.4.1 Moderne Lagenetze sind 3D-Netze

Der allgemeine Siegeszug satellitengestützter Vermessungsverfahren ist offensichtlich. Durch die Absicherung im globalen Bereich über VLBI und SLR werden moderne Netze in allen Entfernungsbereichen GPS -gestützt angelegt und enthalten damit automatisch die dritte Komponente. Klassische Lagefestpunkte sind dabei nur bedingt brauchbar, da sie nicht nur GPS -tauglich sein sollten, sondern auch einen eindeutigen Höhenbezugspunkt aufzuweisen haben (einschließlich Sicherung). Der Trend zu so genannten aktiven Bezugssystemen mit Kommunikation hält dabei an. So weist das EUREF -

Permanent-Network inzwischen weiter über 100 Stationen mit einer noch nicht sehr regelmäßigen Verteilung auf (vergl. Abb. 8). Eine Ansammlung von Permanentstationen ist jedoch nur die Voraussetzung, nicht der Nachwe is für

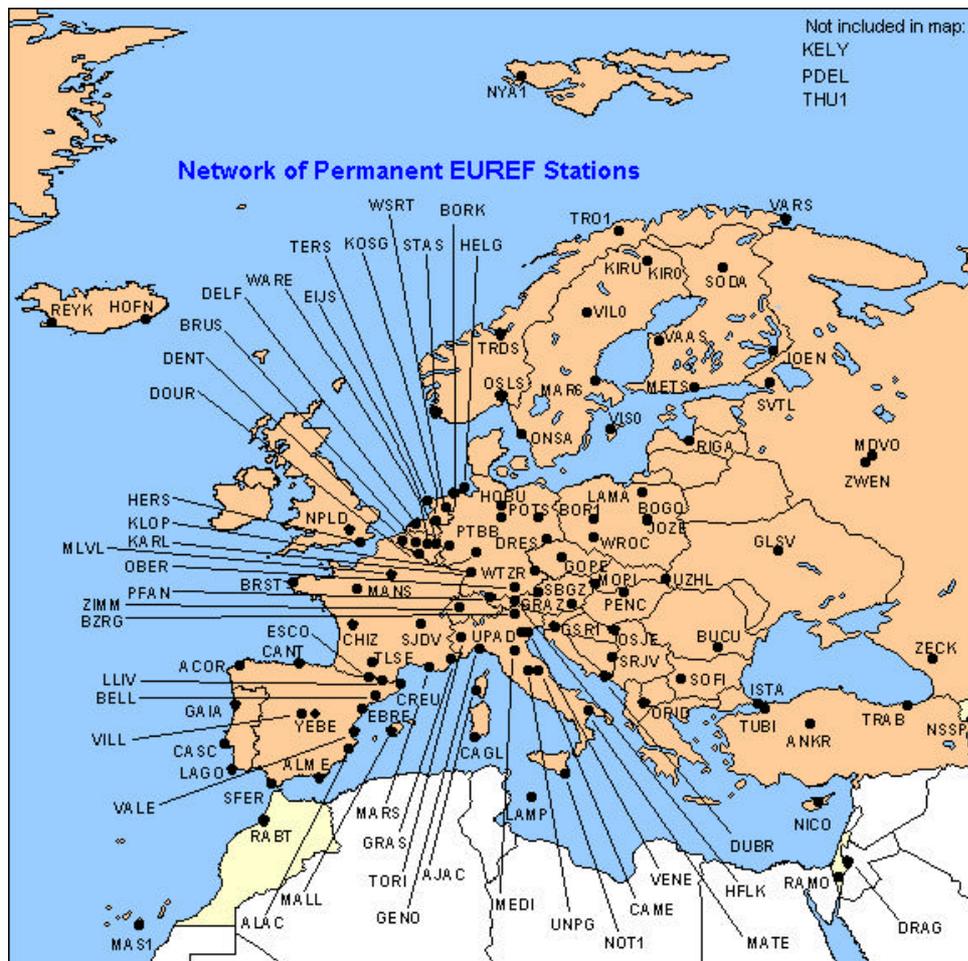


Abb. 8: Stationen des EUREF-Permanentnetzes (Stand 03/2001)

den Betrieb aktiver Bezugssysteme. Hier kommt der deutschen Landesvermessung mit ihrem SAPOS -Konzept und einzelnen Bundesländern mit den jeweiligen Realisierungen europaweit schon eine Vorreiterrolle zu. Sie setzt jedoch immer eine entsprechende Verfahrensentwicklung (wie in Niedersachsen durch das HPPS-Projekt) und die Entscheidung der landesweiten Einführung voraus.

3.4.2 Von statischen zu kinematischen Netzen

Die Dynamik der Erde lässt nur die Beschreibung über ein kinematisch angelegtes Bezugssystem zu. Dies wird global über die Produkte des Internationalen Erdrotationsdienstes realisiert (ITRS_{xx}/ ITRF_{xx}), im kontinentalen und lokalen Rahmen über entsprechende Permanentstationen. Die

Auswahl einer Referenzepoche (ITRF 89 → ETRF 89) kommt dabei nur praktischen Bedürfnissen nach einem statischen Modell nach und bringt der geodätischen Praxis allerdings nur dann eine Erleichterung, wenn sich größere Teile des Landes als „stabil“ im Sinne einer gegenseitigen Unveränderlichkeit erweisen. Wie aus Abb. 9 ersichtlich, in der von E. Brockmann (1999) für europäische GPS-Permanentstationen Veränderungen des ETRF 89 dargestellt wurden, trifft dies für weite Teile Europas zu, aber nicht für Italien, die Türkei oder den westlichen Teil Islands.

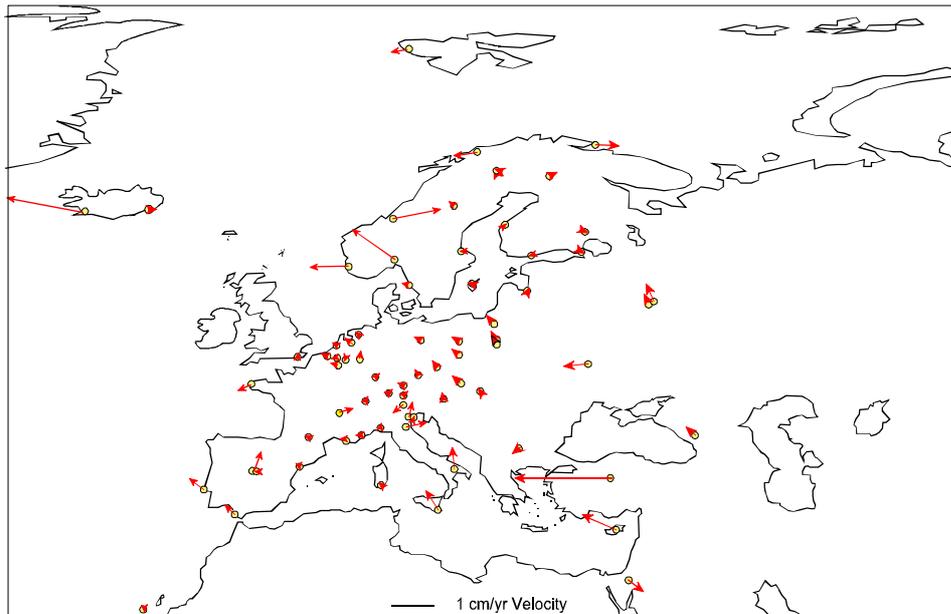


Abb. 9: Veränderungen im ETRF 89

Hinter dem ETRF 89 steht aber weiterhin das ITRFxx, so dass auf jeden Fall Transformationsparameter zwischen der Mess- und der Referenzepoche abgeleitet werden können. In den instabilen Teilen Europas oder auch Deutschlands (Bergsenkungsgebiete) müssen die Informationen von den lokalen Stellen selbst erzeugt werden.

3.4.3 Von der cm- zur mm-Genauigkeit

Der kontinuierliche Anfall von Messwerten auf den Permanentstationen ergibt eine Beobachtungshäufung mit erreichbaren Koordinatengenauigkeiten, die über die klassischer (= sequentiell gemessener) Netze weit hinausgeht. Einen Eindruck über die dabei auftretenden Wiederholungsgenauigkeiten ergibt die in Abb. 10 dargestellte Zeitreihe über etwa 3 Wochen. Erwartungsgemäß schwanken die Lagekomponenten geringer als die Höhenkomponenten. Lässt man die Stationsausstattung und den Auswertalgorithmus über längere Zeit unverändert, so kann man hieraus nicht nur aktuelle Überprüfungen der Stationsstabilität, sondern auch hochpräzise Trends ableiten.

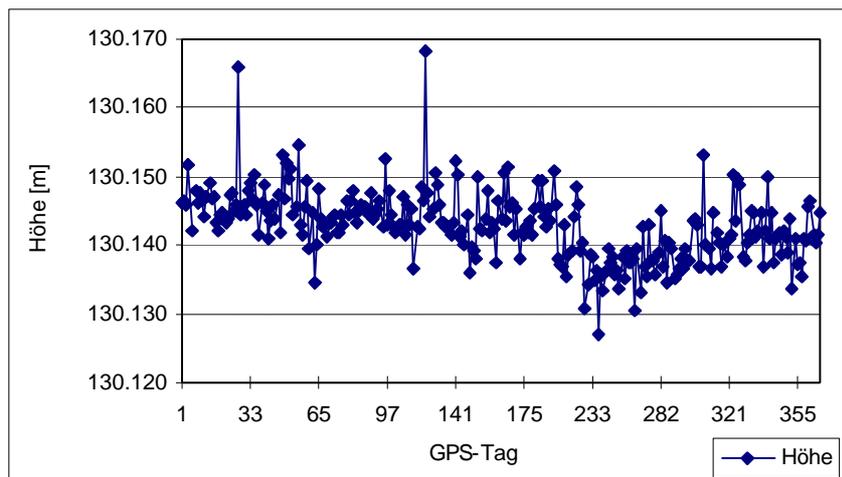
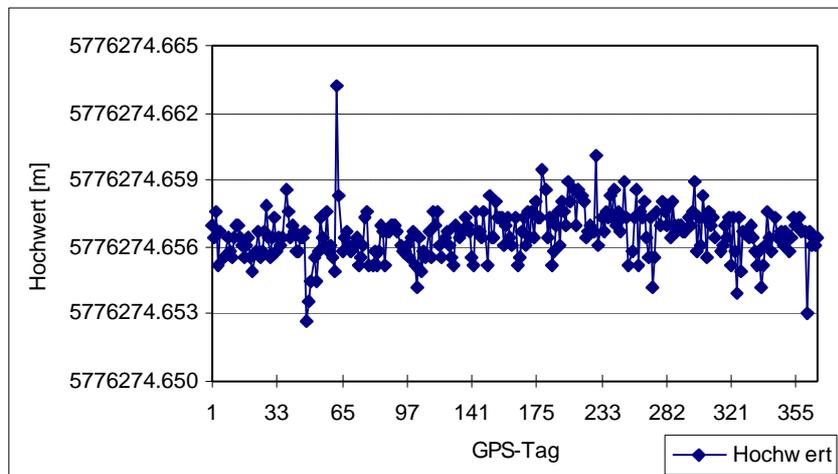
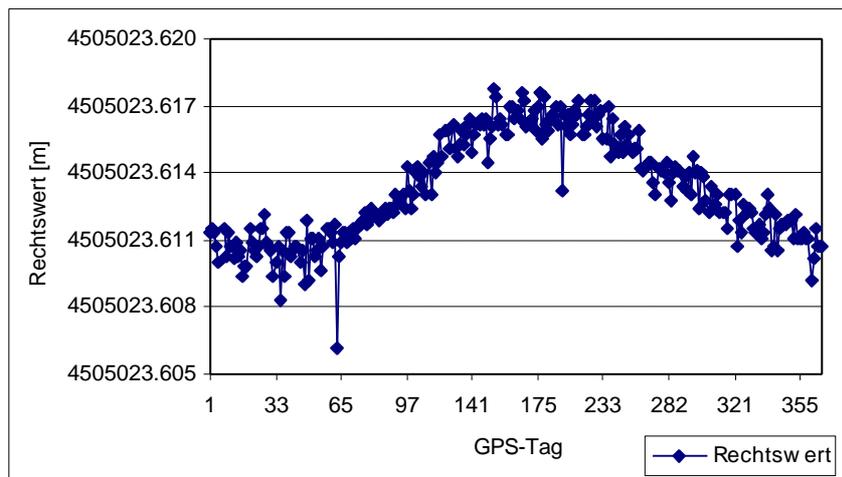


Abb. 10: Zeitreihe einer PGS-Permanentstation

3.4.4 Neue Verfahrenslösungen entwickeln bzw. vervollkommen

Die durch die Referenzstationsnetze geschaffene neue geodätische Infrastruktur erfordert für ihre Nutzung parallel auch die Entwicklung neuer

Verfahrenslösungen. Durch die immer stärker werdenden Echtzeitanwendungen erhalten Fragen der Kommunikation dabei einen immer größeren Stellenwert, sei es aus Verfügbarkeits- oder aus Kostengründen. Für den Anwendungsbereich „GPS in der Liegenschaftsvermessung“ ist dies über das HPPS-Projekt auch gelungen. Voll ausgeschöpft werden die Möglichkeiten von Referenzstationsnetzen jedoch erst, wenn dies auch für weitere Anwendungen geschieht. Das betrifft in Niedersachsen derzeit das NNSAT-Projekt, bei dem in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz und dem Geodätischen Institut der TU Dresden Verfahren zur universellen Höhenüberwachung von Küstenpegeln entwickelt werden, die die GPS-gestützte Überwachung der Nordseeküste mit einschließen (NNSAT 1998). Eine zu HPPS äquivalente Verfahrensentwicklung über den Einsatz satellitengestützter Verfahren im Höhenfestpunktfeld ist in Vorbereitung. Auch sollten Positionierungen mit Metergenauigkeit nicht weiter vorangetrieben werden. Hier findet mit niedersächsischer Beteiligung ein Versuch der Integration von GPS/EGNOS und LORAN-C statt (MULTINAV 2000). Hierbei sollen die komplementären Eigenschaften von weltraumgestützten Verfahren mit denen bodengestützter Verfahren zu einem integrierten Positionierungssystem kombiniert werden, das die Abschattungsproblematik bei GPS beseitigt.

3.4.5 Notwendigkeit der Einhaltung neuer Standards

Unter Verweis auf die Kenngrößen der Tab. 2 (Positionierungsdienste als Service) ist es unverzichtbar zu prüfen, inwieweit die dort aufgeführten Standards schon eingehalten werden. Die Vielzahl noch offener Detailfragen lässt sich auf gewisse Kernbereiche zurückführen.

Einheitlichkeit des Dienstes

Eine landesweite Einheitlichkeit und inzwischen auch Vollständigkeit ist in Niedersachsen gegeben. Kritisch zu hinterfragen wäre jedoch die Einheitlichkeit bundes- oder gar europaweit. Hier sind über die Landesgrenze hinweg noch Defizite auszuräumen, weniger wegen des einheitlichen Erscheinungsbildes, sondern konkret zur Unterstützung länderübergreifend arbeitender Nutzer und der Motivation der Hard- und Softwareindustrie (geringere Kosten durch höhere Stückzahlen).

Vertragliche Sicherstellung der Verfügbarkeit und Qualität der Einzelkomponenten

Alle GPS-Nutzer gehen davon aus, dass ihnen dieses Weltraumsegment auf Dauer zur Verfügung steht. Eine vertragliche Sicherstellung kann die deutsche Landesvermessung nicht erreichen. Dieser Umstand ist nicht weiter kritisch, solange GPS nur ein Verfahren von mehreren darstellt. Sobald jedoch analoge Festpunkte nicht weiter gepflegt und durch einen Positionierungsdienst ersetzt

werden, erhält diese Frage eine neue Bedeutung. Es ist deshalb dringend anzuraten, sich als, - am besten europäische Landesvermessungsgemeinschaft -, aktiv im geplanten europäischen Positionierungssystem GALILEO einzubringen. Die voraussichtlichen Spezifikationen sind aus der Tab. 9 ersichtlich. Das Vermessungswesen ist aus Marktuntersuchungen als starker

- 24 Satelliten im Abstand von 24.000 km
- 3 Bahnebenen
- Inklination $50 - 55^\circ$
- Ergänzung durch geostationäre Satelliten
- Genauigkeit (horizontal: 4 m (2σ))
- Geodätisches Bezugssystem ITRS
- geplante Fertigstellung: 2008

Tab. 9: Konzept des europäischen globalen Navigationssatellitensystems (GNSS 2) GALILEO

Nutzer in der zweiten Reihe bekannt. Dabei sollte die Frage von Gebühren, wenn sie für besondere Leistungen erwartet werden, kein Tabu sein.

Einhalten der Spezifikationen im operativen Betrieb

Durch die Erweiterung der Zielmodells um Echtzeitkomponenten ist bei der Einhaltung der Spezifikationen eine neue Qualität zu verwirklichen. Zwar gelten die klassischen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsprinzipien weiter. Sie sind jedoch um Echtzeitgesichtspunkte zu erweitern. Die Anforderungen der Luftfahrt bieten hierbei eine Zielrichtung, teilweise fehlt eine Umsetzung auf die Verhältnisse im Vermessungswesen.

Das Instrument der Verwirklichung besteht dabei in einem umfassenden **Monitoring**ansatz, der einmal Anforderungen der Gewährleistungspflicht erfüllt und auch schnell und umfassend umfassende Warnungen an der Nutzer erzeugt. Die grundsätzlichen Möglichkeiten hierzu sind bereits im BMBF -Vorhaben HPPS II untersucht worden, sie basieren jedoch, wie z.B. im Dresdener Stationsvalidierungsmodell, eher auf statischen Ansätzen. Eine Umsetzung auf Echtzeitbedingungen steht erst am Anfang.

Status des Landesbetriebes LGN

Der erfolgreiche Betrieb eines Dienstes, der zumindest in Teilbereichen auch Mitbewerber aufweist, lässt sich bei der Komplexität der Teilaufgaben nur durchhalten, wenn das LGN über die gleichen operativen Möglichkeiten verfügt. Dabei ist eine Planungssicherheit für die Bereiche „Definition der Kernaufgabe“, „Flexibilität im Personal - und Finanzeinsatz“ auf geeignete Weise zu realisieren.

4 Ausblick

Der Einsatz satellitengestützter Positionierungsverfahren hat inzwischen eine neue Qualität erreicht. GPS wird nicht mehr nur als genaues, flexibles und wirtschaftliches Vermessungsverfahren eingesetzt. Es ist vielmehr Grundlage für neue Zielmodelle im Lagefestpunktfeld geworden. Nach fast zehn Jahren der Entwicklung und Erprobung sind inzwischen alle Komponenten vorhanden, um auch die Umsetzung vornehmen zu können. Dazu musste das neue Bezugssystem ETRS 89 aufgebaut werden und es war dem Bedürfnis nach höherer Echtzeitfähigkeit zu entsprechen. Das Angebot im Bereich der Bezugssysteme und der Einzelaufnahme konnte so noch einmal deutlich gesteigert werden. Der theoretische Hintergrund, der technische Aufwand und die Anforderungen an den Betrieb sind allerdings mitgewachsen. Die Auswirkungen stellen eine Variante der Globalisierung im Vermessungswesen dar und werden insbesondere das Anforderungsprofil der Betreiber nachhaltig ändern.

5 Literatur

Augath, W. (1993): Konzepte für den Aufbau von 3D-Netzen der Landesvermessung. DVW-Schriftenreihe Heft 11, 1993, S. 186 -202, Wittwer-Verlag, Stuttgart.

Boucher, C., Altamini (1995): Specifications for Reference Frame Fixing in the Analysis of a EUREF GPS Campaign. Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung (BEK) Nr. 56, S. 265 -268, C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München.

Brockmann, E. (1999): Persönliche Mitteilung (unveröffentlicht).

DFNP (1999): Deutscher Funknavigationsplan. <http://www.bmvbw.de/>

Draken, W. (1996): Einsatz des GPS-RTK-Systems zur Bestimmung von Aufnahmepunkten und bei Liegenschaftsvermessungen. Nachrichten der Nds. VuKV, 46, S. 186-194, Hannover.

Fröhlich, M. (1995): Zur Entwicklung eines Hochpräzisen Permanenten Positionierungsservice (HPPS). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 211, Hannover.

IERS (1996): IERS-Technical Note Nr. 21, Paris, 1996.

Jahn, C.-H. (2000): Ein neues aktives Bezugssystem in Niedersachsen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 239, S. 63 -75, Hannover.

Müller, A. (2001): Persönliche Mitteilung (unveröffentlicht).

MULTINAV (2000): BMBF-Projektantrag zur Sensorintegration von GPS/ GLONASS/ EGNOS/ LORAN-C/ UMTS (unveröffentlicht).

NNSAT (1998): BMBF-Projektantrag zur universellen Höhenüberwachung von Küstenpegeln (unveröffentlicht).

Seeger, H. (1997): Aufbau eines neuen geodätischen Bezugssystems in Europa. DVW-Schriftenreihe 28/ 1997, S. 1 30-153, Wittwer-Verlag, Stuttgart.

Tegeler, W. (2000): ETRS 89 und UTM in amtlichen Karten.

Nachrichten der Nds. VuKV, 50, S. 32-34, Hannover.

Wanninger, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen. DGK-Reihe C, Nr. 508, C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München.