F. Auerswald¹, A. Bilajbegović², M. Vierus²

Der Beitrag untersucht das Leistungsspektrum (Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit) des Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) mit Flächenkorrekturparametern (FKP) durch Vernetzung von Referenzstationen gegenüber HEPS ohne FKP

Feldanwendung der RTK-Technologie bei Verwendung vernetzter Referenzstationen mit kurzem historischem Rückblick

1 Einleitung

Der Schwerpunkt des Einsatzes der satellitengestützten Vermessung liegt seit ca. 6 Jahren auf dem Gebiet der Echtzeitanwendungen (RTK), da Koordinaten hier schnell mit geringem Aufwand zur Verfügung gestellt werden können. Als Hauptprobleme für den universellen Einsatz dieser Methode erwiesen sich Mängel hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungsergebnisse sowie die Begrenzung der Verfügbarkeit. Verantwortlich dafür sind neben den Abschattungsbedingungen Multipath-Einflüsse, Beugung der Signale, Störung durch Fremdsignale und Exzentrizitäten der Antennenphasenzentren. Die genannten Fehlereinflüsse lassen sich durch geeignete Wahl des Antennenstandpunktes minimieren. Zusätzlich werden die Messungen längerer Basislinien durch Einflüsse

der Ionosphäre, der Troposphäre und der verfälschten Satellitenkoordinaten (SA) beeinträchtigt bzw. verhindert. Die letztgenannten Fehlereinflüsse, die sich besonders gravierend durch das aktuelle Maximum der Sonnenfleckenaktivitäten auswirken, kann man durch Verwendung vernetzter Referenzstationen und Übermittlung entsprechender Korrekturparameter verkleinern. Das ist, nach unseren Informationen, bei verschiedenen Testmessungen in Bayern, Brandenburg, Berlin, Hamburg, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt nachgewiesen worden. Die hier geschilderten Untersuchungen im Testnetz Sachsen-Anhalt wurden als Feldmessungen für die Abstände 4 m bis 64,2 km durchgeführt. Sie beinhalten einen Vergleich zwischen mit und ohne Flächenkorrekturparametern (FKP) durchgeführten Messungen (Abb. 1).



¹ Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung Sachsen-Anhalt

Abb. 1: Vernetztes Testnetz Sachsen-Anhalt

² University of Applied Sciences Dresden, Germany

Einige Empfängerhersteller (z. B. Leica System 530) haben versucht, das Problem unzuverlässiger Initialisierung mit Kontrolle der Differenzen auszuschalten. Um diese Methode zu testen, wurden Doppelinitialisierungen mit kurzen und längeren Zeitabständen durchgeführt und verglichen.

2 Entwicklung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der RTK-Methode in den letzten Jahren

Die mehrjährigen Untersuchungen verschiedener RTK-Systeme hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit an der HTW Dresden (FH) (s. BILAJBEGOVIĆ und VIERUS 1998 und 1999) sind 1999 unter Einbeziehung der neuen Korrekturmodelle (FKP) fortgeführt worden (s. Tab. 1). Sie beziehen sich auf ein klassisch bestimmtes Netz von 113 Punkten mit einer maximalen Lagestandardabweichung von 4 mm und auf das Testnetz Sachsen-Anhalt.

1999 brachte die Firma Leica eine neue Serie von GPS-Empfängern, das System 500, auf den Markt. Der aus dieser Reihe untersuchte Empfänger SR 530 verfügt über eine

Tab. 1: Anteil grober Fehler an den Messungen 1997, 1998 und 1999

RTK-System	Grobe Fehler Soll-Doppelmessungen									
	In der Lage	In der Höhe								
	> 40 mm in %	> 60 mm in %								
1997										
Geotracer 2200; Softw. 1.12	13,6	18,0								
Trimble 4400	13,7	5,4								
Zeiss GePoS RM 24; Softw. 3.6b	3,0*	0,0*								
Leica SR 399 E	5,4	57,3								
	1998									
Ashtech GG 24	11,9	11,3								
Geotracer 2204; Softw. 1.14	2,4	3,0								
Leica SR 9500	1,5	5,1								
Trimble 4000 SSi	1,6	19,4								
Trimble 4800	2,3	4,6								
	1999									
Leica SR 530	1,1	1,1								
Trimble 4700/4800	2,2	2,2								
Zeiss GePoS Experience; Software vom April 1999	8,1	4,1								

* Bei diesem Test konnten ca. 20 Punkte wegen starker Abschattungen nicht beobachtet werden

neue, von der Firma patentierte Empfängertechnologie, den sogenannten Clear Trak. Diese Neuerung soll laut Herstellerangabe eine Zuverlässigkeit für kurze Entfernungen von besser als 99,99% und für große Entfernungen von besser als 99,9% garantieren.

Die Feldrechner der Firma Trimble verwendeten 1999 die neue Software-Version 7.01.

Aus Tabelle 1 ist sofort ersichtlich, dass sich die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von Jahr zu Jahr merklich verbessert hat.

Zuverlässigkeit und Genauigkeit der 1999 untersuchten Systeme sollen – in Abhängigkeit vom Abschattungsgrad – näher betrachtet werden. In unserem Artikel konzentriert sich der Vergleich auf diese beiden wesentlichen Testkriterien.



Abb. 2: Zuverlässigkeit und Genauigkeit in Abhängigkeit vom Grad der Abschattung für Leica SR 530 und Trimble 4800

Weitere Vergleichskriterien, die bei früheren Untersuchungen angehalten worden sind (s. BILAJBEGOVIĆ und VIERUS 1998), sind hier nicht in die Betrachtung einbezogen worden.

Die von Leica angegebenen Zuverlässigkeiten wurden nur für Punkte mit leichten Abschattungen ohne Einschränkungen erfüllt. Bei mittleren Abschattungen gab es Abstriche für die Lage; bei starkem Abschattungsgrad war die Zuverlässigkeit deutlich geringer als im Prospekt angegeben. Auch beim System Trimble 4800 traten bei starken Abschattungen recht oft grobe Fehler auf. Hier war die relative Zuverlässigkeit des Leica SR 530 sogar noch etwas höher.

Die spezifizierten Genauigkeiten von Trimble (Lage: 10 mm + 2 ppm; Höhe: 20 mm + 2 ppm) und Leica (5–10 mm + 1 ppm) wurden für Punkte mit geringem Abschattungsgrad eingehalten. Bei Punkten mit mittleren und starken Abschattungen wurden die angegebenen Genauigkeiten nicht eingehalten (Ausnahme: Höhenkomponente bei mittleren Abschattungen für Trimble).

3 Vernetzung der Referenzstationen als Antwort auf extreme ionosphärische Aktivität

3.1 Vernetzungskonzepte

Die Fehlerkomponenten bei der GPS-Vermessung kann man in zwei wesentliche Gruppen unterteilen: entfernungsabhängige und stationsabhängige Fehlereinflüsse (s. Tab. 2).

Die Herausforderung für Geodäten, Geräte- und Softwarehersteller ist es, diese Fehlerkomponenten zu minimieren. Durch die Einführung des SAPOS-Dienstes ist eine Möglichkeit entstanden, die entfernungs- und azimutabhängigen Fehleranteile zu modellieren. Prinzipiell gibt es dafür zwei Möglichkeiten: Real-time-Vernetzung der Referenzstationen oder die Vernetzung durch Berechnung virtueller Referenzstationen (Nearonline im Postprocessing, neuerdings auch Online).

Für unser Testnetz haben wir das Verfahren der Real-time-Vernetzung von Wübbena (s. WÜBBENA, 1999) verwendet. Hier werden für die so genannte Multistationslösung Rohphasenmessungen benutzt, um Satellitenbahnen, Ionosphäre, Troposphäre vollständig modellieren zu können und daraus Flächenkorrekturparameter abzuleiten. Das mathematische Modell für dieses Verfahren ist bei Wübbena (WÜBBENA, 1999, S. 83) dargestellt.

Für die Realisierung des Verfahrens gibt es eine zentrale und eine dezentrale Lösung. Bei der dezentralen Lösung würde die Vernetzung auf der Roverstation erfolgen, indem dort aus Rohmessungen mehrerer Referenzstationen Korrekturdaten berechnet würden. Vorteilhaft wäre dabei, dass eine Vernetzung der Referenzstationen unnötig wäre und das Konzept der Einzelstationen beibehalten werden könnte. Dem gegenüber müsste jede Mobilstation mit aufwendiger Kommunikationshardware und sehr leistungsfähigen Rechnern ausgerüstet werden. Bei Ausfall der Verbindung zu einer Station kann keine bezüglich Nachbarschaft und Zuverlässigkeit eindeutige Lösung mehr berechnet werden.

Die zentrale Lösung sieht eine Vernetzung der Referenzstationen vor. Dies erforderte permanenten Datenaustausch und eine spezielle

Tab. 2: Klassifizierung der Fehler nach ihrer Wirkung

C C	0
entfernungsabhängige Fehlereinflüsse	stationsabhängige Fehlereinflüsse
Bahnfehler (ca. 2 ppm bzw. nach Abschaltung von SA ca. 0,3 ppm)	Beugungsfehler (einige Zentimeter bis wenige Dezimeter)
Ionosphäre (ca. 5 ppm; bei maximaler Sonnenfleckenaktivität mit elfjähriger Periode wesentlich größer)	Multipath (bei Phasenmessungen im Millimeterbereich bis zu 3 cm; bei Codemessungen im Meterbereich)
Troposphäre (bis 3 ppm; beeinflusst vornehmlich die Höhenkomponente)	Antennenphasenzentrum (bis ca. 1 cm)

Software (GNNET) auf jeder Referenzstation. Hingegen entfiele die Aufrüstung der Mobilstationen mit zusätzlicher Kommunikations- und Rechentechnik. Im Korrektursignal jeder Station wäre die gesamte vernetzte Auswertung berücksichtigt. Mögliche Probleme auf einer Referenzstation könnten sofort entdeckt und eliminiert werden.

Eine analoge Unterteilung in eine zentrale und eine dezentrale Lösung existiert auch für das Konzept der virtuellen Referenzstation. Diese Methode ist besonders für die Auswertung von Rapid-Static-Messungen geeignet (WANNINGER, 2000). Seit dem Frühjahr 2000 wird sie von der Firma Spectra Precision Terrasat auch als Echtzeitverfahren angeboten.

3.2 Messungen im Testnetz Sachsen-Anhalt

3.2.1 Netzkonfiguration und Ausrüstung

Wie Abb. 1 zeigt, besteht das Testnetz Sachsen-Anhalt aus 4 vernetzten Referenzstationen. Die Feldmessungen wurden auf 8 Punkten, die entweder bei der C-Netz-Messung direkt bestimmt oder durch statische Langzeitmessungen an C-Netz-Punkte angeschlossen worden sind, durchgeführt. Diese Punkte sind mit hoher Genauigkeit bestimmt worden und dienten bei unseren Messungen als Bezugspunkte,



Abb. 3: Roverausrüstung

deren Koordinaten als Sollkoordinaten eingeführt wurden. Um Zentrierungsungenauigkeiten bei Mobilstationen zu minimieren, wurden die Roverantennen mit Stativen und optischen Loten über den Messungspunkten zentriert.

Als Roverausrüstung diente ein Ashtech-GPS-Empfänger Z12 mit zwei verschiedenen GPS-Antennen. Bis zum 125. Tag d.J. wurde eine Trimble-Geodetic-Antenne und ab dem 127. Tag d.J. eine Ashtech-Geodetic-III-Antenne verwendet. Der Feldcomputer war ein Pentop "Fujitsu Stylistic 500". Für die Kommunikation wurde das Funkmodem HRD2000 MicroCom (2-m-Band) und, wenn Telemetrieverbindung nicht möglich war, das D-Netz-Mobiltelefon von Siemens (3Com mit PCMCIA-Modem) genutzt. Für den Empfang der Korrekturen von den SAPOS-Stationen wurde ein SA-POS-Decoder (AdV-Box) verwendet (s. Abb. 3).

3.2.2 Stationäre Messungen

Mit dem Rover wurden auf der Station Halle Süd (HALS) über mehrere Tage hinweg Messungen durchgeführt, wobei verschiedene Referenzstationen verwendet wurden.

Die Messungsergebnisse sind als sehr optimistisch anzusehen, weil

- überproportional viele Lösungen (ohne FKP) in der Nacht bei optimalen Bedingungen erzielt wurden,
- der Rover (HALS) sich in unmittelbarer Nähe einer Stützstelle des Netzes befand,
- das Korrektursignal optimale Qualität hatte,
- die f
 ür die Messung verwendeten Stationen optimale Abschattungsbedingungen aufwiesen,
- der Rover-PC (Pentium, 166 MHz) bei einigen Messungen eine höhere Rechenleistung aufwies als ein Pentop im Außendienst,
- die Störeinflüsse durch die Ionosphäre während der Messungsperiode im März/April 1999 erst ca. 80% des Maximums erreicht hatten.
- In diesem Artikel werden ausge-

Abweichungen der Breite bei RTK mit FKP Tag120 1999 mit RTCM-AdV von BITT mit RTCM-AdV von WEI2 20 15 10 5 0 5 Abweichungen in mm -10 -15 -20 9:00 9:10 9:20 9.50 10:00 10:10 10:20 10:30 10:40 10:50 11:0 9:30 9:40 UTC Abweichungen der Höhe bei RTK mit FKP Tag120 1999 mit RTCM-AdV von BITT mit RTCM-AdV von WEI2 20 angen in mm 15 10 5 0 -5 Abweich -10 -15 -20 10:00 10:10 10:20 10:30 10:40 10:50 11:0 9:00 9:10 9:20 9:30 9:40 9:50 UTC Abweichungen der Länge bei RTK mit FKP Tag120 1999



Abb. 4: Hochpräzise Echtzeitpositionierung mit FKP von zwei Referenzstationen aus am 120. Tag 1999

wählte Beobachtungen aus den Messreihen dargestellt und interpretiert.

Beispielsweise wurden am 120. Tag d. J. die Roverkoordinaten unter Verwendung von FKP von den Stationen Bitterfeld (BITT) und Weißenfels (WEI2) aus berechnet. Die Entfernung zur Station BITT betrug 30,6 km, die zur Station WEI2 29,8 km. Wie Abb. 4 zeigt, ergaben sich für beide Bestimmungsvarianten gut übereinstimmende Lösungen. Die Lageabweichungen von den Sollkoordinaten blieben i. d. R. unter 10 mm, die Höhenabweichungen waren selten größer als 20 mm. Die hier dargestellten Ergebnisse sind typisch für die Verwendung von Hochpräziser Echtzeitpositionierung (HEPS) mit FKP.

Abb. 5 zeigt jedoch, dass Ausnahmebedingungen die Ergebnisse wesentlich beeinträchtigen können.

Tab. 3: Terminliche Durchführung der Messungen

		Ohne	FKP		Mit FKP					
	HALN	WEI2	BITT	SAN2	HALN	WEI2	BITT	SAN2		
Messungs- tage 1999	117–119	085–089	107-108	112–116	117–119	085–089	100	112-116		



Abb. 5: Hochpräzise Echtzeitpositionierung mit FKP von zwei Referenzstationen aus am 121. Tag 1999

Die am 121. Tag 1999 über 24 Stunden aufgezeichneten Koordinatenbestimmungen zeigen große Streuungen und vor allem um die Mittagszeit zahlreiche Ausreißer. Ursache könnten inhomogene ionosphärische Verhältnisse sein. Denkbar wären auch lokale Störeinflüsse an den Referenzstationen oder am Roverempfänger.

Die Messungen ohne FKP, die sich auf die nur 4 m entfernte Referenzstation HALN beziehen, lieferten für die Höhenkomponente eine etwas bessere Standardabweichung als die Messungen mit FKP (s. Tab. 4). Die Zahl der ohne FKP durchgeführten Messungen überstieg die der Messungen mit FKP signifikant, da für die Lösung ohne FKP alle gemessenen Satelliten für die Auswertung herangezogen wurden, während bei der Auswertung mit FKP nur Satelliten, für die FKP vorlagen, verwendet werden konnten. Sichtbar wurde das auch bei den Einzelmessungen, wo die Zuverlässigkeit bei den Messungen ohne FKP 99,87 %, bei den Messungen mit FKP jedoch 99,93 % betrug.

Durch Kontrolle der Differenzen von Doppelmessungen gelang es, grobe Fehler zu minimieren bzw. bei Einführung von Zwischenzeiten fast vollständig zu eliminieren (s. Tab. 5 und 6).

In diesem Nahbereich lagen ca. 98% der Lösungen für die Lage/ Höhe auch ohne FKP weniger als 10 mm/20 mm von den Sollwerten entfernt.

Wenn man die Zuverlässigkeiten und Genauigkeiten auch für die anderen Stationen betrachtet, zeichnet sich eine Entfernungsabhängigkeit ab, die für die Messungen ohne FKP gravierend, für die mit FKP weniger deutlich ausfällt. Die Station BITT fügt sich nicht besonders gut in diesen Trend ein, was an der zeitversetzten Messung (s. Tab. 3) und der geringeren Messungsanzahl liegen könnte.

Differenzenkontrollen bei Doppelmessungen führten zu einer deutlichen Verringerung grober Fehler auch bei den weit entfernten Stationen. Bei den Doppelmessungen mit Zwischenzeit von mindestens einer Stunde wurden fast alle groben Fehler eliminiert.

3.2.3 Feldmessungen

Um HEPS im Netz zu testen, wurden auf 8 Stationen mit unterschiedlichen Abständen zur Referenzstation Feldmessungen durchgeführt. Die Statistik dieser Messreihen zeigt Abb. 6.

Tab.	4 : .	Einzelmessungen	mit u	nd ohne	Flächen	korrekturj	oarameter
------	--------------	-----------------	-------	---------	---------	------------	-----------

			Ohne	FKP			Mit	FKP	
12220	von RS	HAIN	WEI2	BITT	SAN2	RALN	NEI2	BITT	53/82
Entle	ernung in km	0,004	28,9	30,6	47,9	0,004	28,9	30,6	47,9
Messu	ingen gesamt	1589	1803	575	1647	1342	2138	451	2484
	< 10 mm	97,73%	49,255	11,65%	18,52%	98,14%	68,48%	47,89%	60,47%
	< 20 mm	99,75%	86,25%	33,04%	43,599	99,709	94,488	85,378	84,228
Lage	< 30 mm	99,878	91,74%	50,78%	62,11%	99,938	98,648	93,35%	91,75%
	< 40 mm	99,87%	93,01%	68,52%	70,374	99,93%	99,498	96,458	95,378
	Fehlinit	0,13%	5,21%	16,70%	14,09%	0,07%	0,51%	3,558	4,638
10000	< 20 mm	99,758	65,398	27,65%	37,109	98,968	79,28%	43,248	73,83%
100 60	< 40 mm	99,875	88,57%	56,00%	58,539	99,708	95,428	72,06%	88,45%
Höhe	< 60 mm	99,878	93,12%	72,00%	71,778	99,938	98,13%	89,588	93,968
1.000	< 80 mm	99,878	94,07%	78,61%	79,118	99,938	98,978	95,348	95,85%
1.00	Fehlinit	0,135	4,498	15,83%	12,934	0,07%	1,03%	4,668	4,158
	Breite in mm	3,7	13,4	19,2	17,2	3,7	8,2	10,1	10,0
	Lange in mm	2,0	6,9	16,6	20,8	2,0	5,7	7,0	7,6
Stabw	Lage in mm	4,2	15,1	25,4	27,0	4,2	10,0	12,3	12,6
	Höhe in mm	5.5	24,5	39,7	47,7	6,2	17,1	25,2	20,7

Die Standardabweichungen und die systematischen Abweichungen der Mittel der Messungen von den Sollwerten – jeweils mit und ohne FKP – sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Im Weiteren wird darauf Bezug genommen.

Auf Station WEIN wurde der einzige grobe Fehler (> 4 cm) aus allen 266 Doppelmessungen mit FKP im Gesamtnetz registriert. Trotz Einhaltung der Regeln bei der Anwendung des Programmsystems GNS-MART betrug die Lageabweichung in diesem Fall 71 mm. Wegen Begrenzung des Diagramms ist dieser Wert (durch das auf dem südlichen Rand befindliche Dreieck) nicht lagerichtig dargestellt. Als mögliche Ursache kommen kleinräumige ionosphärische Störungen, die durch die Referenzstationsvernetzung nicht erfasst werden können, in Frage. Im Entfernungsbereich bis zu 3 km existieren keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit für die RTK-Anwendung mit und ohne FKP. Die Genauigkeit der Messungen über mittlere und große Entfernungen mit FKP auf WEIN ist als homogen einzuschätzen (s. Abb. 7). Die Diagramme für die anderen 7 Roverstationen zeigen ein ähnliches Bild.

Wir haben die Abweichungen der Mittel der Doppelmessungen von den Sollkoordinaten ohne und mit FKP als Funktion der Entfernung untersucht. In Abb. 8 werden diese



Abb. 6: Übersicht über die RTK-Feldmessungen

			Ohne	FKP			Mit	FKP	
	von RS	BALN	WE12	BITT	SAN2	HALN	WE12	BITT	SANZ
Enth	ernung in km	0,004	28,9	30,6	47,9	0,004	28,9	30,6	47,5
Messi	ungen gesamt	1581	1591	403	1300	1337	2054	420	2307
	< 10 mm	99,118	62,79%	15,88%	22,38%	99,038	79,99%	54,05%	67,45
	< 20 mm	100,008	94,918	48,648	55,548	100,008	97,428	92,14%	89,42
Lage	< 30 mm	100,00%	98,995	67,49%	76,08%	100,008	99,858	97,14%	95,51
-	< 40 mm	100,00%	99,25%	89,08%	85,15%	100,008	100,008	99,76%	98,40
	Fehlinit	0,00%	0,19%	1,74%	2,461	0,008	0,00%	0,24%	1,60
12.72	< 20 mm	100,005	73,85%	33,754	45,08%	99,558	\$6,768	45,40%	79,06
	< 40 mm	100,00%	96,61%	71,22%	69,77%	99,938	98,158	75,95%	92,54
Höhe	< 60 mm	100,008	98,998	87,10%	84,628	100,00%	99,12%	91,43%	97,27
	< 80 mm	100,008	99,438	94,79%	92,15%	100,008	99,46h	97,86%	98,61
	Fehlinit	0,00%	0,138	0,99%	1,854	0,008	0,548	2,148	1,39

17.6

1.6

Tab. 5: Doppelmessungen ohne Zwischenzeit mit Differenzenkontrolle

Tab. 6: Doppelmessungen mit Zwischenzeit und Differenzenkontrolle

13.9

5.4

1.7

			Ohne	FKP			Mit	FKP	
101000	von RS	HALN	WE12	BITT	SAN2	HAIN	WEI2	BITT	SAN2
Enth	ernung in km	0,004	28,9	30,6	47,9	0,004	28,9	30,6	47,9
Messu	ungen gesamt	1310	1488	223	1074	1310	1987	364	2226
	< 10 mm	99,39%	69,83%	19,28%	31,19%	99,398	86,31%	67,58%	72,558
	< 20 mm	100,00%	98,19%	50, 67%	70,028	100,00%	99,50%	96,70%	96,728
Lage	< 30 mm	100,00%	99,87%	71,754	87,8D%	100,00%	100,00%	99,73%	99,78%
	< 40 mm	100,00%	100,00%	95, 96%	95,078	100,00%	100,00%	100,00%	99,968
	Fehlinit	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,048
14533	< 20 mm	99,475	80,31%	39,461	58,578	99, 478	90,74%	39,29%	84,55%
1.20 18.	< 40 mm	100,00%	99,13%	79,82%	82,778	100,00%	99,19%	80,77%	97,808
Höhe	< 60 mm	100,00%	100,004	95,078	34,888	100,00%	99,95%	97,80%	99,558
1000	< 80 mm	100,00%	100,00%	100,00%	99,358	100,00%	99,95%	100,00%	99,918
	Fehlinit	0,00%	0,00%	0,00%	0,008	0,00%	0,05%	0,00%	0,098
	Breite in mm	2,6	7,1	13,3	10,8	2,9	5,5	6,9	7,4
	Lange in mm	1,4	4,6	12,2	12,5	1,4	3,8	4,9	5,5
Stabw	Lage in mm	3,0	8,5	18,0	16,5	3,2	6,7	8,5	9,2
	Höhe in mm	3,9	13,1	22,0	28,9	4,4	12,0	17,9	15,2

Abweichungen in Abhängigkeit von den Entfernungen zu den jeweiligen Referenzstationen dargestellt. Gezeigt werden Lage- und absolute Höhenabweichungen. Die Aussagen von Software-Entwicklern (z. B. WÜBBENA 1999) zur Entfernungsabhängigkeit der Genauigkeit bei HEPS (10 mm + 1 ppm) können im Wesentlichen bestätigt werden. Die in Abb. 8 dargestellten Funktionen sind durch eine lineare Regression mit Festhalten der Absolutglieder

Breite in mm

Lange in mm

Lage in mm

Höhe in m

entstanden. Diese konstanten Anteile von 3,5 mm für die Lage und 5,0 mm für die Höhe sind dabei durch Messungen im Nahbereich bestimmt worden (vgl. auch Tab. 7). Wie schon von WANNINGER und Böhme (1998) gezeigt, sind die Regressionsgeraden für Lage und Höhe annähernd parallel.

6.4

6,8

Bei der Auswertung der Abweichungen der Mittel der Doppelmessungen von den Sollkoordinaten mit FKP wurden die beiden ausglei-



Abb. 7: Lageabweichungen auf der Station Weißenfels Nord (WEIN) als Funktion der Entfernung mit und ohne FKP

 Tab. 7: Standardabweichungen der Doppelmessungen und systematische Abweichungen der Mittel der Doppelmessungen ohne (o) und mit (m) FKP als Funktion der Entfernungen von den Referenzstationen

		BL			-	St	andar	dabwei	chunge	en in r	nm		Syst	emati	sche A	bweich	ung de	er Mit	tel ir	1 mm	BL
		in	Anz	ahl	Bre	ite	Lär	nge	La	ge	Hö	he	Bre	ite	Lär	ige	La	ge	Hö	he	in
Punkt	RS	km	0	m	0	m	0	m	0	m	0	m	0	m	0	m	0	m	0	m	km
HALS	HALN	0,004	5	4	1,5	1,2	1,9	2,6	2,4	2,8	7,8	3,7	-0,6	0,7	0,7	-1,0	0,9	1,2	-5,0	-5,6	0,004
WEIW	WEI2	0,9	11	11	3,0	2,7	2,4	2,4	3,9	3,7	5,6	5,4	-0,7	0,4	0,2	0,8	0,7	0,9	3,0	0,0	0,9
WEIN	WEI2	2,9	9	10	5,1	4,1	2,5	2,6	5,7	4,8	3,7	7,3	-2,8	0,5	1,1	-1,4	3,0	1,5	3,6	-2,9	2,9
5003	WEI2	4,7	8	9	7,3	4,2	4,2	2,6	8,4	5,0	2,9	11,6	-6,6	0,0	3,7	-0,5	7,6	0,5	16,8	12,1	4,7
5006	HALN	7,6	10	11	5,2	10,1	4,2	6,9	6,7	12,3	4,8	16,1	-2,3	-2,3	14,4	-1,6	14,6	2,8	20,5	11,8	7,6
5007	BITT	10,4	8	8	13,5	3,6	8,7	5,4	16,1	6,5	18,0	15,5	16,9	1,7	22,3	3,8	28,0	4,2	11,5	9,3	10,4
MERS	HALN	13,1	12	12	10,7	3,0	9,2	2,4	14,1	3,9	23,2	9,1	21,9	1,4	2,6	1,3	22,1	1,9	-14,2	0,8	13,1
MERS	WEI2	15,8	8	9	11,7	1,9	4,1	3,5	12,4	4,0	27,3	15,0	-12,7	4,1	2,9	5,5	13,0	6,9	28,9	11,0	15,8
5007	HALN	20,2	10	10	52,6	8,1	38,7	3,3	65,3	8,7	39,9	9,3	-19,0	3,3	-10,5	5,2	21,7	6,2	-10,4	4,0	20,2
5004	WEI2	21,1	4	8	14,5	10,7	4,3	9,6	15,2	14,4	24,9	24,8	-3,0	6,3	18,0	4,3	18,2	7,6	31,4	14,4	21,1
5003	HALN	25,0	9	13	36,9	6,2	10,1	5,2	38,2	8,1	12,4	15,3	38,0	0,2	13,6	1,6	40,4	1,6	5,0	5,4	25,0
WEIN	HALN	26,0	7	11	24,1	7,1	12,7	3,9	27,2	8,1	16,1	3,4	15,7	1,3	2,7	2,3	15,9	2,6	-21,8	1,0	26,0
WEIW	HALN	28,1	5	11	84,3	13,0	24,2	12,7	87,7	14,4	16,9	21,7	56,0	2,1	3,3	4,2	56,1	4,7	-36,2	5,4	28,1
HALS	WEI2	28,9	5	7	21,0	3,2	17,1	3,2	27,1	4,5	52,8	18,9	2,0	1,1	-4,7	-3,8	5,1	4,0	14,3	-10,6	28,9
HALS	BITT	30,6	6	8	9,4	8,1	16,1	6,1	18,7	10,1	32,5	43,2	1,4	5,2	11,2	0,9	11,3	5,3	-20,8	-6,8	30,6
5004	HALN	30,8	1	7		12,3		9,1		15,3		16,1	36,3	1,3	25,2	6,9	44,2	7,0	-13,1	1,9	30,8
5006	WEI2	32,0	2	5		8,5		7,5		11,3		23,1	-40,5	18,5	8,5	-2,9	41,4	18,7	17,5	22,6	32,0
5006	BITT	35,2	0	6		17,1		3,6		17,5		25,4		-0,8		-6,0		6,1		10,7	35,2
5004	SAN2	36,2	0	8		6,8		10,1		12,2		22,2		2,2		0,0		2,2		9,6	36,2
5006	SAN2	40,6	1	5		8,5		12,5		15,2		23,6	11,6	11,6	-42,0	0,0	43,6	11,6	27,0	3,7	40,6
MERS	BITT	40,8	0	5		7,7		5,1		9,3		5,7		6,8		0,5		6,8		9,7	40,8
5007	WEI2	45,2	0	6		4,0		4,5		6,1		15,9		-0,2		8,2		8,2		10,2	45,2
HALS	SAN2	47,9	2	4		8,8		4,7		10,0		22,4	19,0	-2,8	-13,9	-6,9	23,5	7,4	12,8	16,5	47,9
MERS	SAN2	49,0	0	6		3,3		4,1		5,2		19,0		4,8		0,8		4,9		5,3	49,0
WEIN	BITT	51,4	0	10		7,4		5,0		8,9		20,9		0,2		-2,3		2,3		5,7	51,4
5003	BITT	51,6	0	9		8,6		3,7		9,3		14,4		3,0		0,0		3,0		-9,2	51,6
5003	SAN2	52,0	1	10		6,7		4,3		8,0		12,9	22,1	-0,2	-6,3	0,6	23,0	0,6	-48,9	1,1	52,0
WEIW	BITT	53,6	0	10		6,6		6,4		9,2		23,0		-2,0		-1,1		2,3		1,1	53,6
WEIN	SAN2	54,7	0	9		7,6		3,9		8,6		6,5		4,9		-1,9		5,3		11,0	54,7
WEIW	SAN2	55,3	0	10		6,0		3,9		7,1		12,4		-1,7		-0,6		1,8		8,0	55,3
5004	BITT	61,2	0	7		12,1		6,7		13,8		14,6		-2,9		-2,5		3,8		26,5	61,2
5007	SAN2	64,1	0	7		9,4		4,6		10,4		17,9		8,6		8,2		11,9		19,8	64,1

Abb. 8:

Abweichungen der Mittel der Doppelmessungen von den Sollkoordinaten ohne FKP

Abb. 9:

Abweichungen der Mittel der Doppelmessungen von den Sollkoordinaten mit FKP

chenden Geraden ebenfalls durch eine lineare Regression über den gesamten Entfernungsbereich gefunden. Die Additionskonstanten ergaben sich wieder durch Mittelbildung der Abweichungen im Nahbereich (bis 5 km). Die Entfernungsabhängigkeit von 0,1 ppm für die Lage und 0,25 ppm für die Höhe war signifikant geringer als bei der Messung ohne FKP (s. Abb. 9). Wie die Untersuchungen zeigten, ist eine Entfernungsabhängigkeit ab einer Entfernung von 15 km für die Lage nicht mehr nachweisbar. Bei der Analyse der Lageabweichungen im Bereich zwischen 15 und 64,2 km ergab sich eine Regressionsgerade $F_{L} = 9.5 \text{ mm}$ + 0,002 ppm, also praktisch 0 ppm. Für die Höhe ist ab ca. 20 km keine Entfernungsabhängigkeit mehr feststellbar. Die Regressionsanalyse im





Tab. 8: Standardabweichungen als Funktion der Entfernung von der Referenz-station ohne und mit FKP

Entfernung zur	Messungen	ohne FKP	Messungen mit FKP				
Referenzstation	σ_L in mm	$\sigma_{\rm H}$ in mm	σ_L in mm σ_H in m				
bis 10 km	5,3	5,0	5,6	8,8			
10 bis 20 km	14,0	22,9	4,7	13,2			
20 bis 40 km	38,9	27,9	11,4	20,3			
grösser 40 km	_	_	9,2	16,1			

- Anzahl und Geometrie der empfangenen Satelliten,
- ionosphärischen Aktivitäten,
- Übertragungsqualität der Korrekturdaten und
- bei schwierigen Bedingungen von der Rechenleistung der Feldcomputer.

Bereich zwischen 21 km und 64,2 km ergab $F_H = 16,7 \text{ mm} + 0,003 \text{ ppm}.$

Die Vernetzung homogenisiert insbesondere den Bereich mittlerer und großer Entfernungen, so dass eine mittlere Genauigkeit bei 10 mm liegt. Eine Maximalentfernung, bei der eine Genauigkeit von 10 mm noch eingehalten werden kann, konnte im Rahmen dieses Tests nicht festgestellt werden.

Zur Untersuchung der Zuverlässigkeit der Messungen mit und ohne FKP wurden die gesamten Messungen in 4 Entfernungsbereiche eingeteilt (< 10 km, 10-20 km, 20-40 km und > 40 km). Die Trends der Lagezuverlässigkeit als Funktion der Entfernung lassen sich im Rahmen definierter Abweichungsklassen aus Abb. 10 deutlich ablesen. Bei den insgesamt 124 Doppelmessungen über alle Entfernungen mit HEPS waren 31% aller Lageabweichungen kleiner als 10 mm. Jede fünfte Lösung war mehr als 40 mm von den Sollkoordinaten entfernt. Dagegen lagen die Abweichungen der Mittelwerte der 266 Doppelmessungen mit HEPS im Netz zu über zwei Dritteln (71%) im Bereich unter 10 mm, wobei nur eine Messung jenseits der 40-mm-Grenze lag. Bezüglich der Höhe wurden bei den Untersuchungen mit HEPS bei 46,8 % aller Messungen Abweichungen unter 15 mm festgestellt. 66,9% der Höhenabweichungen waren kleiner als 30 mm. Bei Verwendung von HEPS mit Vernetzung der Referenzstationen lagen 64,3 % der Abweichungen unter 15 mm und 85,7 % der Abweichungen unter 30 mm.

Die Initialisierungszeiten bei Messungen mit und ohne FKP wurden in Abhängigkeit von den Entfernungen zu den Referenzstationen untersucht. Die Initialisierungszeit ist darüber hinaus von folgenden äußeren Bedingungen abhängig:



Abb. 10: Entfernungsabhängige Zuverlässigkeit der Doppelmessungen ohne (HEPS) und mit (HEPS-Netz) FKP für die Lage



Abb. 11: Entfernungsabhängige Zuverlässigkeit der Doppelmessungen ohne (HEPS) und mit (HEPS-Netz) FKP für die Höhe



Abb. 12: Zusammenhang zwischen Initialisierungszeit und Entfernung zur Referenzstation mit und ohne FKP

Aus den Untersuchungen lässt sich eine Entfernungsabhängigkeit der Initialisierungszeiten, besonders für die Messungen ohne FKP, nachweisen. Bis zu einem Entfernungsbereich von 10 km gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messungen mit und ohne FKP (s. Abb. 12).

Die benötigten Zeiten zur Lösung der Mehrdeutigkeiten für mindestens 4 Satelliten betrugen 65 s für die Messungen mit und 85 s für die Messungen ohne FKP. Unter sehr schlechten Bedingungen konnten die Phasenmehrdeutigkeiten für eine nur 4 m lange Basislinie nicht einmal innerhalb von 5 min gelöst werden.

Wie Abb. 12 zeigt, homogenisiert RTK mit FKP die Initialisierungszeiten über den gesamten Entfernungsbereich und verkürzt die Lösungszeiten ab einer Entfernung von 10 km deutlich.

Wir haben festgestellt, dass kürzere Initialisierungszeiten genauere Positionen liefern. Bei den Messungen mit FKP brachten Lösungszeiten unter 100s in 84% der Fälle Lageabweichungen unter 15 mm. während Lösungszeiten über 100s diesen Betrag auf nur noch 60 % sinken ließen. In Voruntersuchungen außerhalb dieser Testmessungen haben wir empirisch ermittelt, dass bei extrem langen Initialisierungszeiten (6 min und länger) ca. ein Drittel Fehlinitialisierungen auftreten. RTK-Lösungen sind also nicht "erzwingbar". Führen HEPS-Netz-Messungen nach 2-3 Minuten nicht zu einer Lösung, ist die Initialisierung abzubrechen und zu einem späteren Zeitpunkt erneut zu versuchen.

4 Schluss

Die Untersuchung der Zuverlässigkeit aller herkömmlicher RTK-Systeme zeigt eine jährliche Steigerung. Genauigkeit und Zuverlässigkeit bleiben jedoch abhängig vom Grad der Abschattung. Eine Zuverlässigkeit von "besser als 99,99%" erscheint gerade unter diesem Gesichtspunkt bei weitem zu optimistisch. Die von der Firma Leica eingeführte Doppelinitialisierung mit Differenzkontrolle - aber ohne Zwischenzeit - verbessert die Zuverlässigkeit der Initialisierungen. Der Anteil von Fehlinitialisierungen mit FKP bei abschattungsfreien Punkten betrug bei unseren Untersuchungen bei insgesamt 2307 Messungen 1,6%. Als Ursachen kommen vor allem Mehrwegeausbreitungseinflüsse, Beugung der Signale und teilweise entfernungsabhängige Fehler in Frage.

Bei 390 Doppelmessungen im Außendienst und ca. 10000 Lösungen aus Langzeitmessungen wurden im Frühjahr 1999 herkömmliche RTK-Messungen mit Messungen unter Berücksichtigung von FKP verglichen. Dabei wurde ein Entfernungsbereich von 4 m bis 64,2 km abgedeckt. Zusammenfassend können für den genannten Zeitraum und für gut geeignete GPS- Punkte (!) folgende Aussagen getroffen werden:

Die Vernetzung der Referenzstationen

- erhöht ab 5 km die Genauigkeit von RTK-Messungen
- verkürzt ab 10 km die Initialisierungszeit
- verbessert ab 15 km die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung
- ermöglicht am Tag praktikable Messungen über 20 km
- homogenisiert die Genauigkeit (von 20 bis 60 km)
- verringert die Anzahl der notwendigen Wiederholungsmessungen auf einem Punkt
- initialisiert in einigen Fällen schon mit 4 Satelliten.

Das getestete Programmsystem GNSMART der Firma Geo++ gewährleistet Zentimetergenauigkeit nahezu entfernungsunabhängig (untersucht bis 64,2 km). Bei Anwendung der hier vorgestellten Methode der Doppelmessung mit mindestens einer Stunde Zwischenzeit und Differenzkontrolle wird GPS-Echtzeitpositionierung (unter dem Vorbe-Abschattungsfreiheit!) halt der mit sehr hoher Zuverlässigkeit (99,62 %) in großen Gebieten möglich.

Die Vernetzung der Referenzstationen ist eine unabdingbare Voraussetzung für einen flächendeckend funktionierenden HEPS-SAPOS-Dienst. Besonders wegen der zur Zeit verstärkten Sonnenaktivitäten ist mit einem Rückgang der Reichweite herkömmlicher RTK-Systeme, einschließlich HEPS, zu rechnen.

Danksagung

Unser Dank für Mitarbeit und Unterstützung gilt allen beteiligten Herstellerfirmen, die uns ihre Ausrüstungen zur Verfügung gestellt haben (s. Tab. 1), und dem Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung Sachsen-Anhalt.

Literatur

BILAJBEGOVIĆ, A. und VIERUS, M. (1998): Genauigkeitsuntersuchungen und Vergleich mehrerer Real-Time-GPS-Systeme. Allgemeine Vermessungsnachrichten 11-12/98, S. 380–387 BILAJBEGOVIĆ, A. ,GROETCHEN, T., VIERUS, M. und WEBER, T. (1999): Untersuchungen der hybriden GPS-GLONASS-Empfänger Ashtech GG 24 RTK für Praxiseinsätze. Allgemeine Vermessungsnachrichten 8-9/99, S. 274–283

WANNINGER, L. und BÖHME, J. (1998): Verwendung virtueller Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen. Allgemeine Vermessungsnachrichten 3-4/98, S. 113–118

WANNINGER, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. DGK, Reihe C, Heft Nr. 508, München

WÜBBENA, G. und BAGGE, A. (1999): Neuere Entwicklungen zu GNSS-RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit: Referenzstationsnetze und Multistations-RTK-Lösungen. GPS-Praxis und Trends '97. Konrad Wittwer Verlag GmbH, Stuttgart, S. 73–92 Anschrift des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. Asim Bilajbegovic´ HTW Dresden Friedrich-List-Platz 1 01069 Dresden Fax: (03 51) 4 62 21 91 Tel.: (03 51) 4 62 34 20

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt im ersten Teil die Untersuchung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit herkömmlicher RTK-Messsysteme verschiedener **Erzeugerfirmen. Schwerpunkt** ist jedoch die Untersuchung des Leistungsspektrums (Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit) des Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) mit Flächenkorrekturparametern (FKP) durch Vernetzung von **Referenzstationen gegenüber** HEPS ohne FKP. Dabei wurden ca. 10000 stationäre Messungen mit unterschiedlichen Entfernungen von den **Referenzstationen und fast** 1000 Feldmessungen mit Entfernungen von 4 m bis 64,2 km durchgeführt. Wegen des größeren Einflusses der Ionosphäre sind diese Testmessungen besonders aktuell. Außerdem wurden die Initialisierungzeiten von HEPS mit und ohne FKP als Funktion der Entfernung von den **Referenzstationen untersucht.**