

Zur Bildung von Subnetzen in der Referenzstationsver- netzung mit GNSMART

Konzepte und Untersuchungen

Dr.-Ing. G. Wübbena, Dipl.-Ing. A. Bagge, Dipl.-Ing. Thomas Hoppe

Geo++[®]

**Gesellschaft für satellitengestützte geodätische
und navigatorische Technologien mbH**

Steinriede 8, D-30827 Garbsen

Garbsen, den 6. September 2001

Diese Studie wurde durchgeführt mit Unterstützung durch das Landesvermessungsamt Brandenburg, das auch umfangreiche Daten seiner SAPOS-Referenzstationen zur Verfügung gestellt hat.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 GNSMART-Vernetzungskonzept	1
2.1 GPS-Grundprinzip.....	1
2.2 DGPS-Grundprinzip.....	2
2.3 GNSMART-Konzept.....	4
2.4 Entfernungsabhängige Fehlereinflüsse.....	5
2.4.1 Langwellige Fehlereinflüsse.....	6
2.4.2 Kurzwellige Fehlereinflüsse.....	6
3 Auswertansätze	6
3.1 Optimaler Auswertansatz.....	6
3.2 Aufteilung in Subnetze.....	7
3.3 Probleme der Aufteilung.....	8
3.4 Varianten der Aufteilung.....	9
3.4.1 Unabhängige Teilnetze.....	9
3.4.2 Teilnetze mit Überlappung an den Rändern.....	9
3.4.3 »Hierarchischer« Netzaufbau.....	10
3.4.4 »Hierarchischer« Netzaufbau mit Überlappung.....	11
4 Weitere Aspekte	12
4.1 Monitoring.....	12
4.2 Redundanz bei Ausfall.....	12
5 Untersuchungen	13
5.1 Versuchsaufbau.....	13
5.1.1 Datenquelle.....	13
5.1.2 Netzaufbau.....	13
5.1.3 Einstellungen im Netz.....	17
5.1.4 Monitorstation.....	17
5.1.5 Einstellungen am Rover (Monitorstation).....	18
5.2 Ergebnisse Netzberechnung.....	19
5.3 Ergebnisse Monitorstation.....	19
5.3.1 Genauigkeit.....	19
5.3.2 Initialisierungszeit.....	24
5.4 Vergleich.....	25
6 Fazit	25

7 Literaturhinweise.....25

1 Einleitung

Das Land Brandenburg hat seit 1995 den flächendeckenden Aufbau von GPS-Referenzstationen kontinuierlich vorangetrieben. Seit dem Jahr 2000 ist der Vollausbau mit 21 Stationen erreicht. Um eine flächendeckend homogene Qualität der Versorgung mit Korrekturdaten in Echtzeit zu gewährleisten, soll ab 2001 die Vernetzung der Referenzstationen nach dem GNSMART-Konzept betrieben werden.

Die Verarbeitung aller Stationen eines großen Netzes beansprucht umfangreiche Rechenkapazitäten, die es ab einer bestimmten Netzgröße erforderlich machen, eine Aufteilung vorzunehmen. Dabei sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, um eine optimale Lösung zu finden. Geo++ hat Untersuchungen durchgeführt, um die Realisierbarkeit einer optimalen Lösung an Hand von Beobachtungsdaten aus dem Referenzstationsnetz Brandenburg zu verifizieren.

2 GNSMART-Vernetzungskonzept

2.1 GPS-Grundprinzip

Das Funktionsprinzip der Positionsbestimmung mit GPS beruht auf dem Konzept der Entfernungsmessung zu vier oder mehr Satelliten (Abbildung 1). Prinzipiell gilt diese Betrachtungsweise für Code-Messungen ebenso wie für Trägerphasenmessungen.

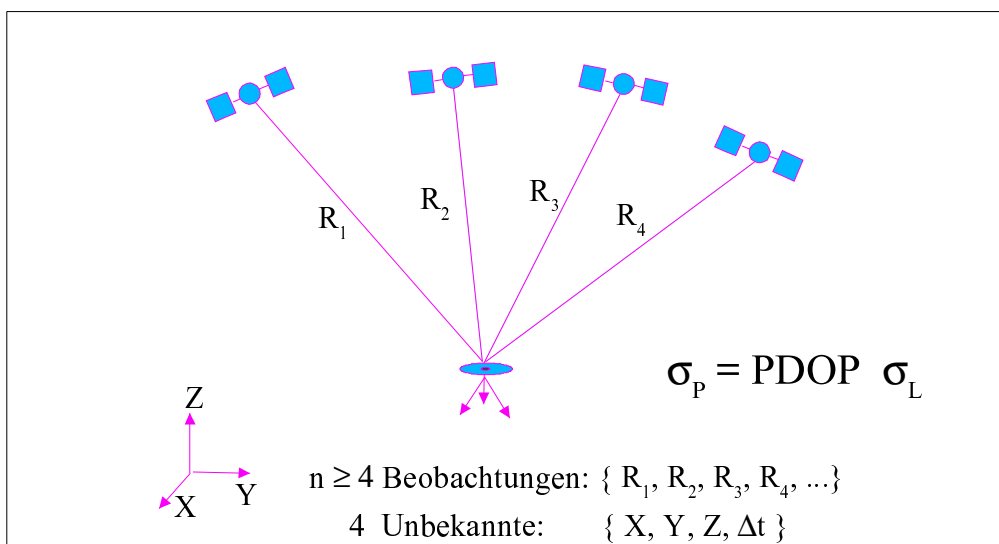


Abbildung 1: GPS-Grundprinzip

Die Genauigkeit σ_P der Positionsbestimmung hängt neben dem heute meist konstanten Geometriefaktor PDOP unmittelbar davon ab, mit welcher Genauigkeit σ_L die Beobach-

tungen (Entfernungsmessungen) zur Verfügung stehen.

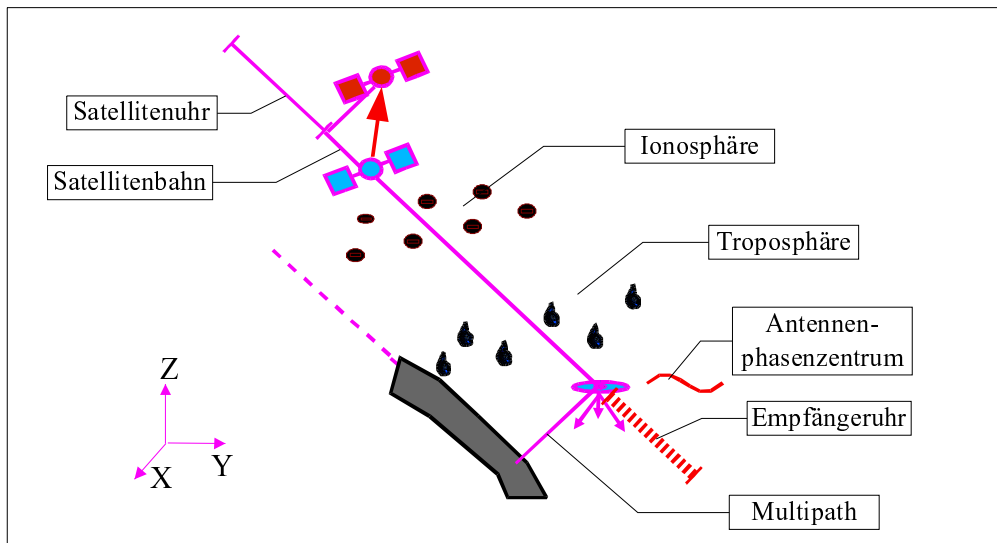


Abbildung 2: GPS-Fehlereinflüsse

Die verschiedenen Fehlereinflüsse (Abbildung 2) sind in Ihrer Größenordnung heute weitgehend bekannt. Damit kann auch ihr Einfluß auf die Positionsbestimmung abgeschätzt werden (Tabelle 1):

<i>Fehlerquelle</i>	<i>Absoluter Einfluß</i>
Satellitenbahn	5 ... 50 m
Satellitenuhr	5 ... 100 m
Ionosphäre	0,5 ... >100 m
Troposphäre	0,01 ... 0,5 m
Multipath Code	m
Multipath Phase	mm ... cm
Antenne	mm

Tabelle 1: Absoluter Einfluß der GPS-Fehlerquellen

Da alle Fehlereinflüsse gleichzeitig wirken, ist eine absolute Positionsbestimmung in Echtzeit mit GPS heute mit einer Genauigkeit von bestenfalls einigen Metern möglich.

2.2 DGPS-Grundprinzip

Eine Möglichkeit, die Genauigkeit σ_p der Positionsbestimmung zu steigern, besteht darin, möglichst viele Fehlereinflüsse zu erfassen und damit die Genauigkeit σ_L zu verbessern. Dazu werden von einer Referenzstation mit bekannten Koordinaten aus die (Pseudo-)Entfernungen zu allen sichtbaren Satelliten gemessen und mit den aus bekannten Koordi-

naten gerechneten Entfernungen verglichen. Die Differenz ist der Korrekturwert, mit dem ein Rover seine eigenen (Pseudo-) Entfernungen verbessern kann.

Dieses Konzept des Differentiellen GPS geht von der Annahme aus, dass die auf der Referenzstation ermittelten Fehlereinflüsse in gleicher Weise auch auf dem Rover auftreten. Dies ist jedoch nur in der Nähe der Referenzstation der Fall. Nur einige der oben genannten Fehlereinflüsse sind unabhängig vom Ort. Einige Fehlereinflüsse sind stationsabhängig, bei anderen kann eine gewisse Korrelation - abhängig von der Entfernung - angenommen werden (Abbildung 3).

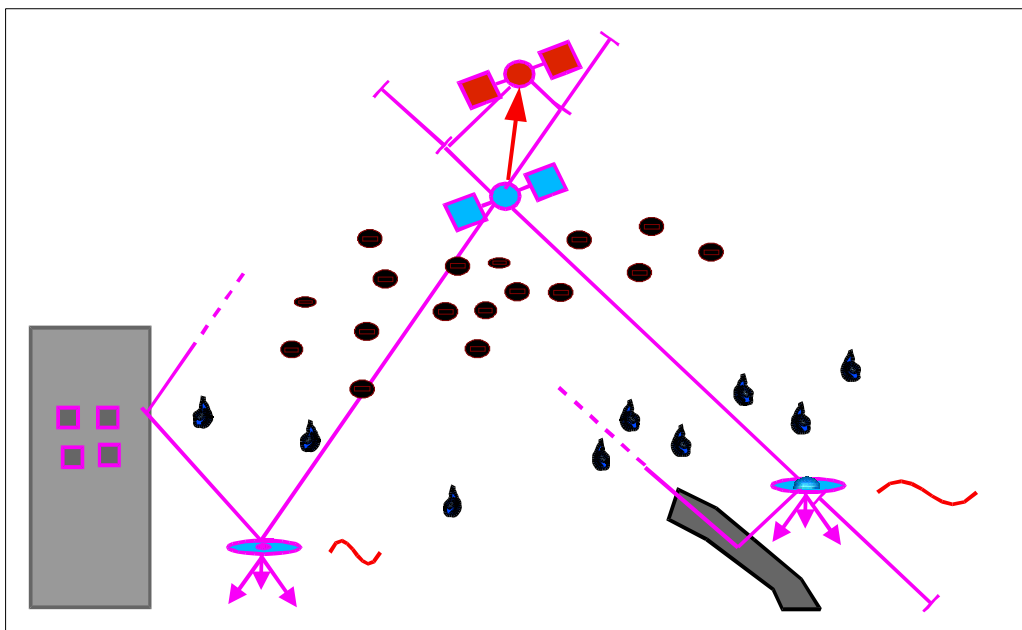


Abbildung 3: räumliche Variationen der Fehlereinflüsse

Für DGPS ist damit nicht der absolute Einfluss, sondern ein relativer Einfluss der einzelnen Fehlerquellen maßgeblich. Je nach Art der Fehlerquelle kann der Einfluss eliminiert werden, oder er wirkt als ein konstanter oder als ein entfernungsabhängiger Fehler. Letzterer wird im Allgemeinen in *parts per million* (ppm) angegeben (Tabelle 2).

<i>Fehlerquelle</i>	<i>Relativer Einfluß</i>
Satellitenbahn	0 ... 2 ppm
Satellitenuhr	0
Ionosphäre	1 ... >50 ppm
Troposphäre	<3 ppm
Multipath Code	m
Multipath Phase	mm ... cm
Antenne	mm ... cm

Tabelle 2: Relativer Einfluß der GPS-Fehlerquellen

Es bleiben im wesentlichen die drei entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse

- Satellitenbahn,
- Ionosphäre,
- Troposphäre.

Aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen in der Atmosphäre ist die aktuelle Größenordnung des Troposphären- und insbesondere des Ionosphäreneinflusses sehr variabel, überlagert von tageszeitlichen und jahreszeitlichen Perioden sowie einem elfjährigen Sonnenzyklus.

Die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse lassen das DGPS-Konzept nur für begrenzte Entfernungen brauchbar erscheinen. Für Code-Beobachtungen, deren Auflösung ohnehin auf Meterngenauigkeit begrenzt ist, sind dies Hundert oder mehr Kilometer, für Trägerphasenbeobachtungen (RTK) dagegen unter Umständen zehn oder weniger Kilometer.

2.3 GNSMART-Konzept

Das GNSMART-Vernetzungskonzept ermöglicht es, die entfernungsabhängigen Fehler für DGPS- und RTK-Anwendungen zu berücksichtigen, um den tatsächlichen Gesamtfehlereinfluss für einen beliebigen Rover-Standort genau angeben zu können.

GNSMART verfolgt dazu den Ansatz, die unterschiedlichen Fehlereinflüsse vollständig voneinander zu trennen. Alle Fehler werden in komplexen Modellen beschrieben. Die Parameter der Modelle werden aus den aktuellen Beobachtungsdaten aller Referenzstationen in einer sequentiellen Ausgleichung ermittelt.

Die aktuellen Parameter für alle Fehleranteile werden als Systemzustand bezeichnet und kontinuierlich neu berechnet. Kennt man den Systemzustand, kann man - im Rahmen der von Netzdesign und Modellschärfe - die Summe aller Fehlereinflüsse für jeden Ort des

Netzes, also auch einen beliebigen Rover-Standort, rechnerisch bestimmen. Mit dieser Kenntnis kann ein Rover quasi eine Absolutbestimmung seiner Position mit RTK-Genauigkeit vornehmen (Abbildung 5).

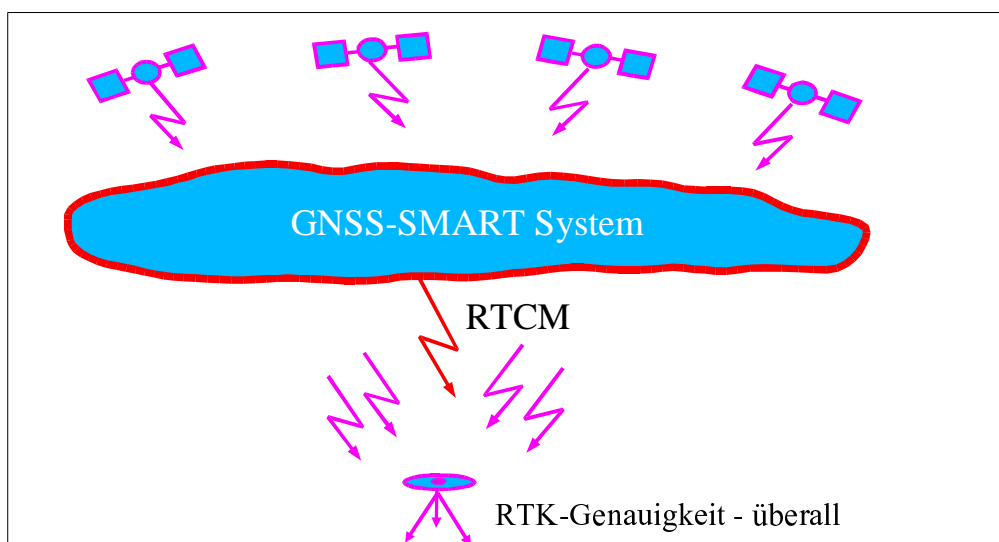


Abbildung 4: GNSMART aus Nutzersicht

Um die für RTK notwendige Genauigkeit zu erreichen, müssen die Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten aller Entfernungsmessungen gelöst werden. Die dispersiven Eigenschaften in der Ionosphäre, mit deren Hilfe der Ionosphäreinfluss durch Zweifrequenzmessungen wesentlich reduziert werden kann, können nur mit eindeutigen Codemessungen oder bei gelösten Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten ausgenutzt werden.

Die Trennung der Fehlereinflüsse gelingt durch eine Kombination verschiedener Techniken. Bedingung ist die sorgfältige Kalibrierung aller beteiligten Geräte, insbesondere der Antennen, sowie hochgenaue Koordinaten der Referenzstationen. Die vollständige Modellierung schließt ein, dass die zeitlichen und räumlichen Korrelationen für jeden Fehlereinfluss im Modell berücksichtigt und ggf. adaptiv, d.h. aus dem Beobachtungsmaterial heraus, bestimmt werden. In der Regel reichen die Informationen aus einer einzigen Messepoche nicht aus, um die Mehrdeutigkeiten bestimmen zu können. GNSMART nutzt daher auch die zeitlichen Korrelationen einzelner Fehlereinflüsse, um die Fehler voneinander trennen zu können. So sind selbst bei schwacher Konfiguration (z.B. wenige Stationen oder wenige Satelliten) oder geringen Restfehlern (z.B. aus Multipath, Antennen oder Koordinaten) oder großen Entfernungen noch saubere Mehrdeutigkeitslösungen möglich, wenn auch unter Umständen erst nach vielen Minuten.

2.4 Entfernungsabhängige Fehlereinflüsse

Sobald die Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten gelöst sind, steht in einem GNSMART-Sy-

stem ein vollständiges Modell zur Verfügung, das den aktuellen Zustand aller relevanten Fehlereinflüsse beschreibt.

Das Modell gilt streng nur für das Gebiet, das von den Referenzstationen abgedeckt wird. Außerhalb des Gebietes kann der Systemzustand nicht erfasst werden. In der Praxis geht der Gültigkeitsbereich des Modells über die äußersten Referenzstationen hinaus, da mit dem Systemzustand auch die horizontalen Gradienten bekannt sind, so dass bis zu einem gewissen Grad extrapoliert werden kann.

Für die weitere Betrachtung ist wichtig, dass die entfernungsabhängige Korrelation für verschiedene Fehlereinflüsse und zeitlich unterschiedlich groß sein kann. Man sollte daher zwischen *langwelligen* und *kurzwelligen* Fehlereinflüssen unterscheiden, da für beide Anteile unterschiedliche Strategien zur Erfassung eingesetzt werden müssen.

2.4.1 Langwellige Fehlereinflüsse

Fehlereinflüsse mit hoher räumlicher Korrelation sind hauptsächlich Satellitenbahnfehler und das globale Ionosphärenverhalten. Die Strategie zur Erfassung dieser mehr globalen Fehler liegt darin, eine möglichst große Netzausdehnung zu realisieren. Je weiter die äußersten Punkte des Netzes auseinander liegen, desto geringer ist die Korrelation für diese Fehlereinflüsse, so dass sie für die Modelle bestimmbar werden. Im Idealzustand liefert ein kontinentales oder ein globales Netz die besten Voraussetzungen.

Dabei sollten die Abstände zwischen benachbarten Referenzstationen nicht zu groß werden, weil sonst die Bestimmung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten unangenehm lange dauern kann.

2.4.2 Kurzwellige Fehlereinflüsse

Fehlereinflüsse mit geringerer räumlicher Korrelation sind hauptsächlich kleinräumige Ionosphären- und Troposphärenvariationen. Änderungen in der Größenordnung von Millimetern sind unter Umständen bereits über wenige Kilometer spürbar. Diese Fehler können nur mit entsprechend kleinen Punktabständen zwischen den Referenzstationen ermittelt werden. Für Zentimeter-Anforderungen reicht in der Regel ein Punktabstand von 50-70 km aus.

3 Auswertansätze

3.1 Optimaler Auswertansatz

Für die Auswertung mit GNSMART müssen also mehrere Anforderungen erfüllt werden.

Einerseits sollen möglichst viele Stationen pro Fläche, andererseits soll ein möglichst großes Gebiet abgedeckt werden.

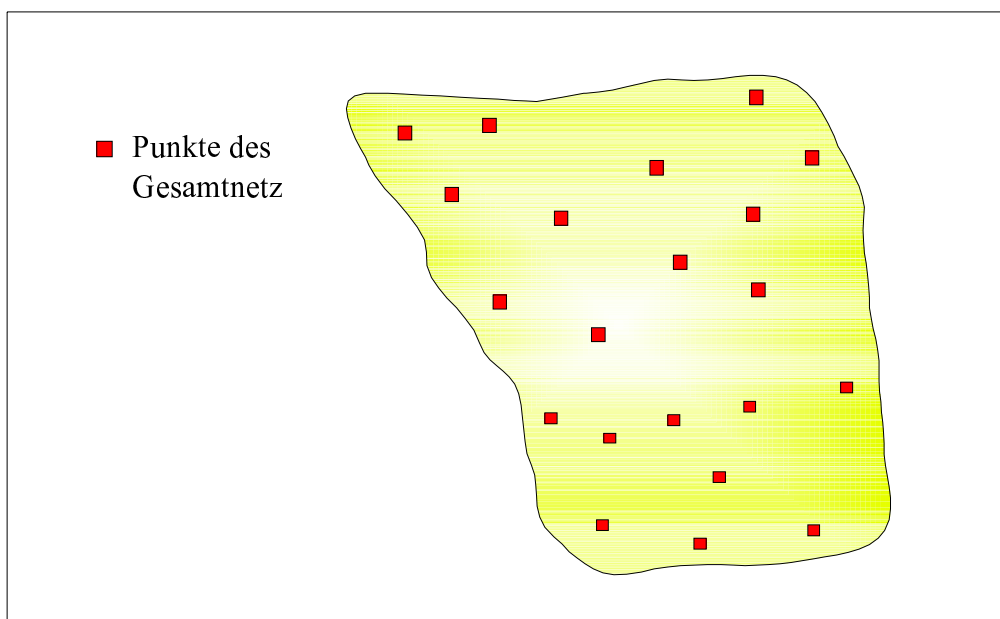


Abbildung 5: Gesamtnetz als optimaler Auswerteansatz

Der optimale Auswerteansatz besteht theoretisch darin, alles in einem Guss auszuwerten, d.h. das gesamte Fehlermodell wird aus den Beobachtungen aller verfügbaren Stationen berechnet (Abbildung 5).

Aufgrund der Komplexität der Modelle in GNSMART wächst die Anzahl der Unbekannten bei zusätzlichen Stationen schneller als linear an. Bei endlicher Rechenkapazität gibt es naturgemäß eine Grenze für die Anzahl der Stationen, die nach dem optimalen Auswerteansatz prozessiert werden kann.

3.2 Aufteilung in Subnetze

Eine Lösung bietet die Bildung von Teilnetzen, in denen eine Untermenge von Stationen prozessiert wird. Die Teilnetze können dann auf verschiedene Rechner verteilt werden. Damit wird eine Skalierung auf beliebige Netzgrößen möglich.

Die Größe der Teilnetze ist abhängig einerseits vom Modellumfang und Modellkomplexität und andererseits von der Kapazität der beteiligten Rechner. Die erforderliche Rechenkapazität für eine gegebene Anzahl von Stationen lässt sich nur ungefähr abschätzen und ist zudem fließend.

Es muss mindestens eine Grundlast kontinuierlich bereitgestellt werden. In einer sequentiellen Ausgleichung müssen hier die Beobachtungen eingelesen und die Unbekannten berechnet werden. Der Umfang ist abhängig von der Anzahl der Stationen, der aktuellen

Satellitenanzahl und den gewählten Modelleinstellungen.

Zusätzlich ist für die Mehrdeutigkeitssuche ein Spitzenbedarf erforderlich. Die hierfür verfügbare Rechenkapazität beeinflusst die Initialisierungszeit und damit die Verfügbarkeit, insbesondere von niedrigstehenden Satelliten.

Eine knapp bemessene Rechnerkapazität beeinträchtigt also zunächst nicht die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems, sondern führt »nur« zu einer schlechteren Performance. Die Übergänge sind insofern fließend.

Beispiele für zur Zeit laufende Installationen siehe Tabelle 3. Bei keiner dieser Installationen werden die Rechnerressourcen bisher voll ausgeschöpft.

<i>Rechnerausstattung</i>	<i>Netzgröße</i>	<i>Installation</i>	<i>Bemerkungen</i>
PIV/1,5GHz/512MB	20 Stationen	Sachsen-Anhalt	
Dual-PIII/1GHz/1GB	9 Stationen	Hamburg	11 Stationen geplant
PIII/866MHz/566MB	12 Stationen	LGN	
PII/450MHz/128MB	8 Stationen	Baden-Württemberg	
Dual-PII/450MHz/128MB	12 Stationen	Rheinland-Pfalz	
PII/400MHz/128MB	8 Stationen	LGN	

Tabelle 3: Erfahrungen mit Rechnerleistung und Netzgröße

3.3 Probleme der Aufteilung

Bei der Aufteilung der Netze in Teilnetze ergeben sich unter Umständen verschiedene Probleme.

- **Erhalt der vollen Information**
Durch die Bildung von Teilnetzen soll möglichst wenig Information verloren gehen. Insbesondere die langwelligen entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse können bei kleinen Teilnetzen nicht mehr so gut bestimmt werden.
- **Kontinuität**
In den Grenzbereichen benachbarter Teilnetze soll die Kontinuität gewahrt bleiben. Für einen Rover soll es keinen Unterschied machen, über welches Teilnetz er seine Korrekturdaten bezieht.
- **Nutzerzugriff**
Bei einer zentralen Kommunikationslösung werden die Korrekturdaten nur von einer zentralen Stelle abgegeben, z.B. über eine einzige Telefonnummer. Für den Nutzer soll die Zuordnung zum richtigen Teilnetz möglichst automatisch und transparent erfolgen.

3.4 Varianten der Aufteilung

3.4.1 Unabhängige Teilnetze

Bei einer Aufteilung in mehrere unabhängige Teilnetze (Abbildung 6) fließt keine Station in mehr als ein Subnetz ein.

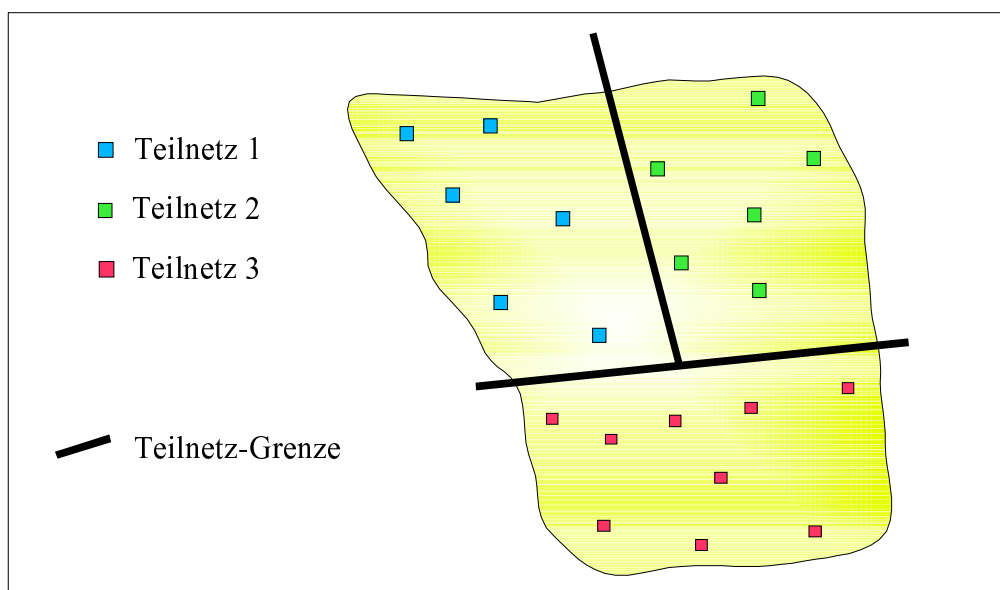


Abbildung 6: Unabhängige Teilnetze

Dieser Ansatz ist zwar einfach zu realisieren. Von theoretischen Ansatz her löst er aber keines der oben genannten Probleme. Insbesondere die fehlende Kontinuität an den Übergängen können in der Praxis zu Schwierigkeiten führen. Dieser Ansatz wird daher nicht näher untersucht.

3.4.2 Teilnetze mit Überlappung an den Rändern

Als eine Erweiterung des vorgenannten Konzepts können einzelne oder alle Stationen an den Rändern der Teilnetze gemeinsam genutzt werden (Abbildung 7).

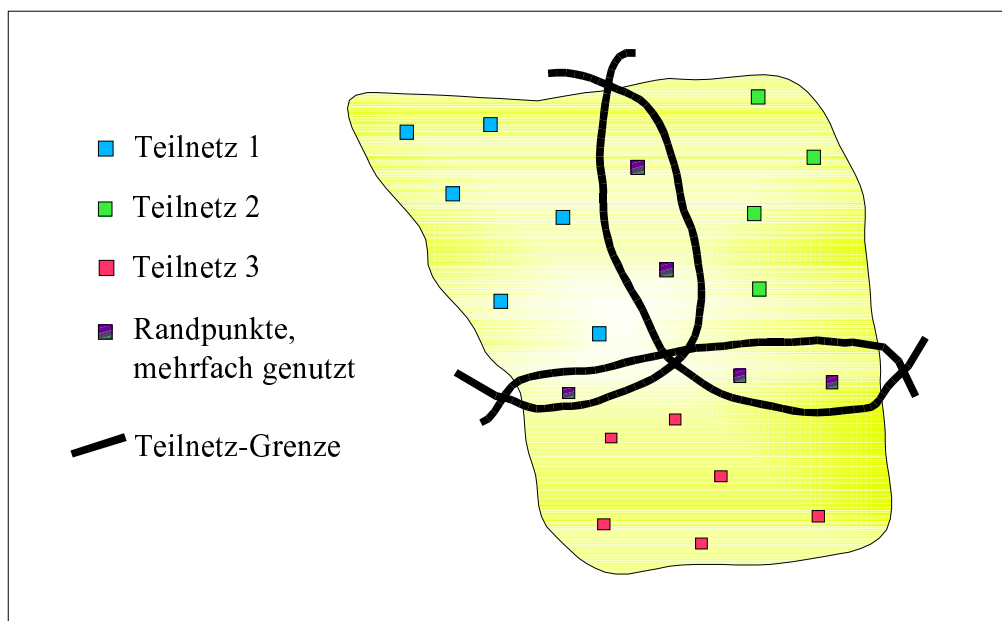


Abbildung 7: Teilnetze mit Überlappung

Die Datenströme dieser gemeinsam genutzten Stationen werden dupliziert und in zwei (oder mehr) Netzlösungen verwendet. Diese Vorgehensweise gewährleistet einen kontinuierlichen Übergang an den Teilnetzgrenzen.

Für die Einbeziehung von Referenzstationen der Nachbarländer ist dieses Verfahren ebenfalls geeignet.

Es bleibt allerdings auch bei dieser Variante der Nachteil, dass die langwelligen entfernungsabhängigen Fehleranteile mangels Netzausdehnung nicht optimal bestimmt werden können.

3.4.3 »Hierarchischer« Netzaufbau

Die dritte Variante lehnt sich an den Gedanken eines hierarchischen Netzaufbaus an. Zwar wird kein separates übergeordnetes Netz explizit gebildet und ausgewertet. Dennoch werden einige global verteilte Punkte ausgewählt, die mit geringerer Dichte das gesamte Landesgebiet abdecken. Alle diese Global-Punkte werden in jedes Teilnetz eingebunden. Jedes Teilnetz prozessiert also zusätzlich zu den Punkten des eigenen Gebiets einige entfernt liegende Punkte aus dem Gesamtnetz (Abbildung 8).

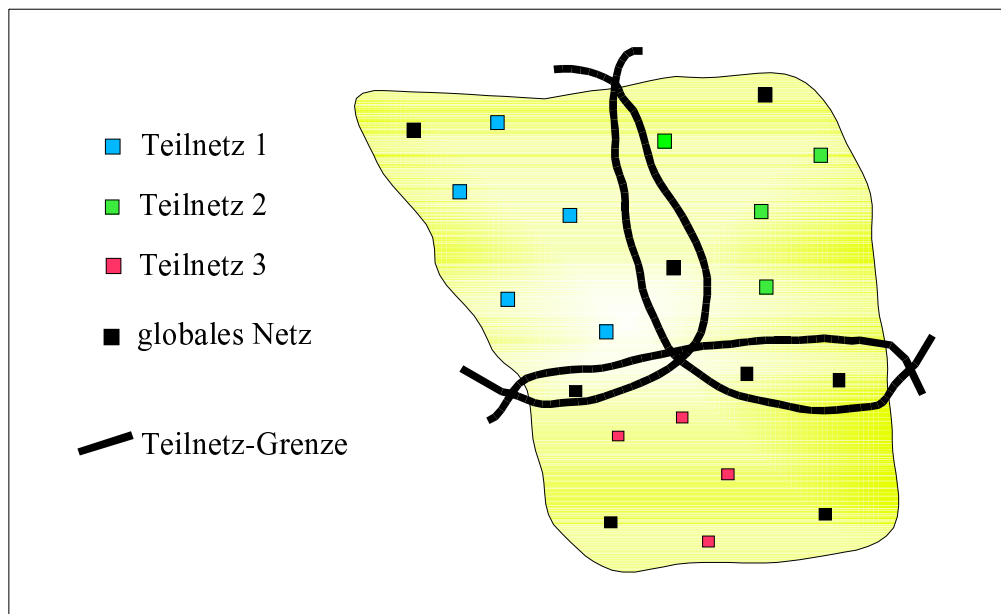


Abbildung 8: "Hierarchischer" Netzaufbau

Dadurch werden alle oben genannten Forderungen trotz Teilnetzbildung bestmöglich erfüllt.

Gefährlich können in diesem Zusammenhang die unter Umständen sehr großen Stationentfernungen zu den globalen Stationen sein, wenn die Mehrdeutigkeiten auf diesen Stationen nicht schnell genug gelöst werden können.

Vorteile dieses Netzaufbaus können sich theoretisch ergeben, weil eine bessere Redundanz und unabhängige Monitoring-Möglichkeiten zur Verfügung stehen, selbst bei Vergleich mit der »optimalen« Variante (vgl. oben) einer Ausgleichung in einem Guss. Auf diese Aspekte wird unten noch im einzelnen eingegangen.

3.4.4 »Hierarchischer« Netzaufbau mit Überlappung

Eine weitere Optimierung im Hinblick auf eine noch bessere Kontinuität an den Netzrändern kann eine Kombination des »hierarchischen« Aufbaus mit einer vollständigen Überlappung an den Netzrändern sein. Jedoch hat diese Variante den Nachteil, dass unter Umständen zu viele Punkte pro Teilnetz bearbeitet werden müssen. In der Praxis ist diese Variante daher weniger von Bedeutung.

4 Weitere Aspekte

4.1 Monitoring

Unabhängig von der Frage der optimalen Teilnetzbildung besteht die Forderung, die Ergebnisse der Netzauswertung mittels möglichst unabhängiger Monitorstationen kontinuierlich zu überprüfen.

In der Regel ist es dazu erforderlich, zusätzlich zu den im Netzverbund arbeitenden Referenzstationen eine separate Monitorstation einzurichten, die als RTK-Rover konfiguriert und mit den Korrekturdaten aus dem Referenzstationsnetz versorgt wird.

Beim »hierarchischen« Netzaufbau ergibt sich darüber hinaus die interessante Möglichkeit, ein weitgehend unabhängiges Monitoring eines Teilnetzes mittels einer der unbeteiligten Referenzstationen durchzuführen. Eine Referenzstation aus einem benachbarten Teilnetz, die auch nicht als globale Station verwendet wird, liefert stochastisch unabhängige Messinformationen. Wird diese Station als RTK-Rover konfiguriert und mit Korrekturdaten aus dem Nachbarnetz versorgt, so findet eine weitgehend unabhängige Kontrolle statt (Abbildung 9).

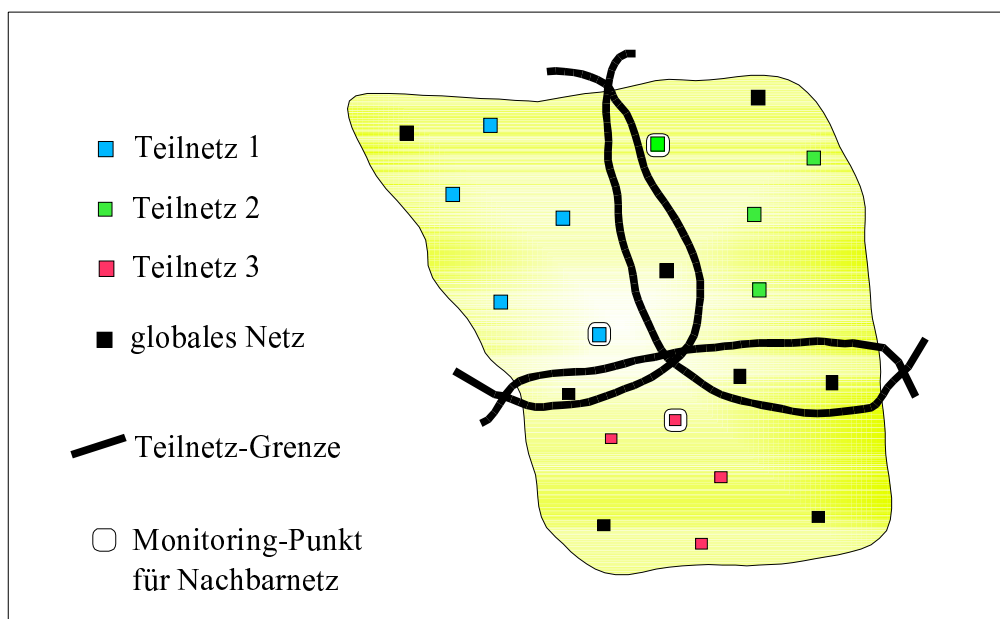


Abbildung 9: Monitoring durch Station des Nachbarnetzes

4.2 Redundanz bei Ausfall

Der »hierarchische« Netzaufbau bietet die höchste Ausfallsicherheit beim Ausfall eines Teilnetzes. Wenn beispielsweise der für die Berechnung eines Teilnetzes verwendete

Rechner ausfällt, kann der Systemzustand der GPS-Fehlereinflüsse immer noch aus den Globalparametern der Nachbarnetze abgeleitet werden. Zwar fehlt dann die Modellierung der kurzweiligen entfernungsabhängigen Fehler, aber die langweiligen Anteile können trotzdem recht gut modelliert werden. Ein Rover hat damit immer noch wesentlich bessere Korrekturdaten zur Verfügung als er von einer einzelnen Referenzstation erwarten kann.

5 Untersuchungen

Für konkrete Untersuchungen wurden 3 Teilnetze nach dem »hierarchischen« Netzaufbau gebildet. Aus den RTCM-Daten aller 21 Referenzstationen wurden sodann im Postprocessing die Bedingungen des Echtzeit-Betriebs simuliert.

Besonderes Augenmerk galt dem Performance-Verhalten der Mehrdeutigkeitslösung, auch im Vergleich zu den anderen Konzepten zur Teilnetzbildung.

5.1 Versuchsaufbau

5.1.1 Datenquelle

Für die Untersuchungen standen aufgezeichnete RTCM-Daten aller 21 Referenzstationen im 1-Sekunden-Takt in Brandenburg zur Verfügung. Auf eine Untersuchung mit Echtzeitdaten wurde verzichtet, da die wesentlichen Merkmale, die hier zu untersuchen waren, auch durch eine Postprocessing-Auswertung erreicht werden können. Im Postprocessing können prinzipiell dieselben Module verwendet werden, die auch im Echtzeit-Netz zum Einsatz kommen. Das Einlesen der RTCM-Daten im Postprocessing wird durch einen speziellen Synchronisationsmodus in GNNET gesteuert.

5.1.2 Netzaufbau

Für die Untersuchungen gingen wir davon aus, dass maximal 12 Stationen pro Rechner prozessiert werden sollen. Diese Beschränkung ist angesichts der Erfahrungen mit anderen Installationen unter Umständen enger als erforderlich, läßt aber andererseits genügend Spielraum für Spitzenlasten oder zukünftige Erweiterungen.

Es wurden nach dem »hierarchischen« Netzaufbau (teilweise mit Überlappung) drei Teilnetze mit jeweils 12 Stationen gebildet. Die Auswahl der Punkte im Netzgebiet erfolgte nach topologischen Gesichtspunkten, so dass jedes Teilnetz bei vorgegebener Punktzahl jeweils ein abgeschlossenes Gebiet mit möglichst großer Fläche und möglichst geringem Umfang bildet. Die Auswahl der übergreifenden Punkte erfolgte so, dass mit möglichst wenig zusätzlichen Punkten das gesamte Netzgebiet abgedeckt werden konnte.

Wie aus kurzen Voruntersuchungen hervorging, ist das Gesamtnetz klein genug, um nur den äußeren Rand des Gesamtnetzes besetzen zu müssen; Zwischenpunkte zur zur Vermeidung überlanger Stationsentfernungen sind nicht erforderlich. Dies kann bei anderen Installationen mit größerer Netzausdehnung unter Umständen erforderlich werden.

Im einzelnen:

- Teilnetz **Nordwest**, mit 8 Punkten im Netzgebiet und 4 Punkten außerhalb (siehe Abbildung 10 und Tabelle 4, außerhalb liegende Punkte *kursiv* dargestellt),
- Teilnetz **Nordost**, mit 8 Punkten im Netzgebiet und 4 Punkten außerhalb (siehe Abbildung 11 und Tabelle 5),
- Teilnetz **Süd**, mit 9 Punkten im Netzgebiet und 3 Punkten außerhalb (siehe Abbildung 12 und Tabelle 6).

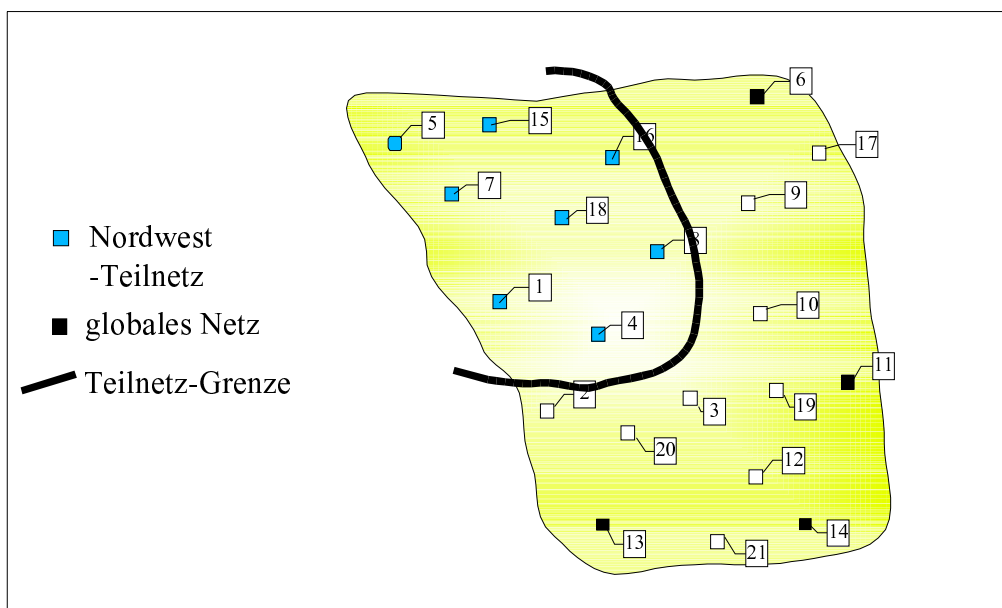


Abbildung 10: Teilnetzes »Nordwest« mit 4 globalen Punkten

<i>Station</i>	<i>interne Nummer</i>	<i>Name</i>
0001	9001	Brandenburg a.d.H.
0004	9004	Potsdam
0005	9005	Perleberg
0007	9007	Kyritz
0008	9008	Oranienburg
0015	9015	Wittstock
0016	9016	Gransee
0018	9018	Fehrbellin
0006	9006	Prenzlau
0011	9011	Frankfurt/O.
0013	9013	Herzberg
0014	9014	Cottbus

Tabelle 4: Punkte im Subnetz Nordwest

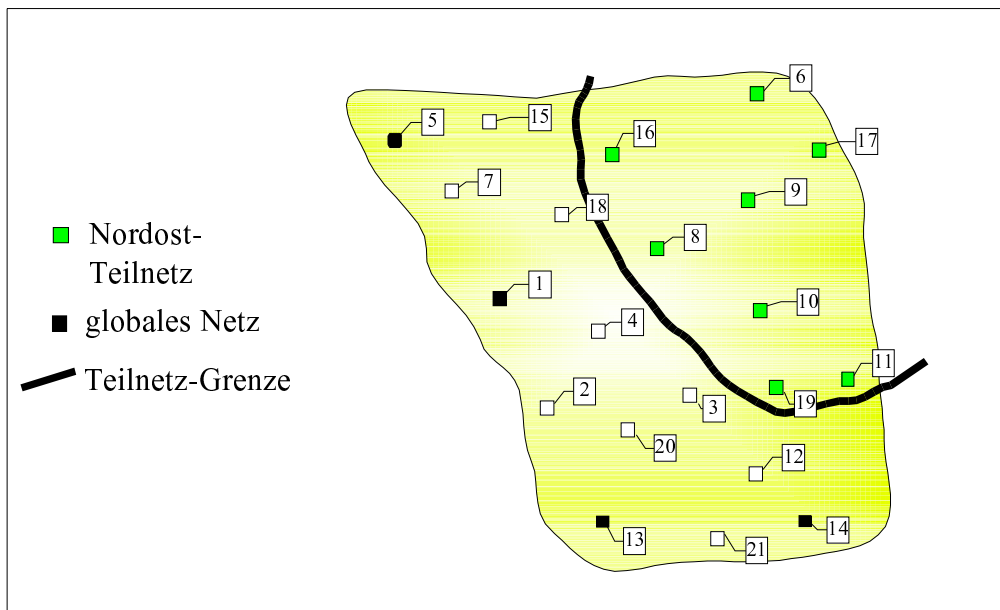


Abbildung 11: Teilnetzes »Nordost« mit 4 globalen Punkten

<i>Station</i>	<i>interne Nummer</i>	<i>Name</i>
0006	9006	Prenzlau
0008	9008	Oranienburg
0009	9009	Eberswalde
0010	9010	Straußberg
0011	9011	Frankfurt/O.
0016	9016	Gransee
0017	9017	Schwedt
0019	9019	Storkow
0001	9001	<i>Brandenburg a.d.H.</i>
0005	9005	<i>Perleberg</i>
0013	9013	<i>Herzberg</i>
0014	9014	<i>Cottbus</i>

Tabelle 5: Punkte im Subnetz Nordost

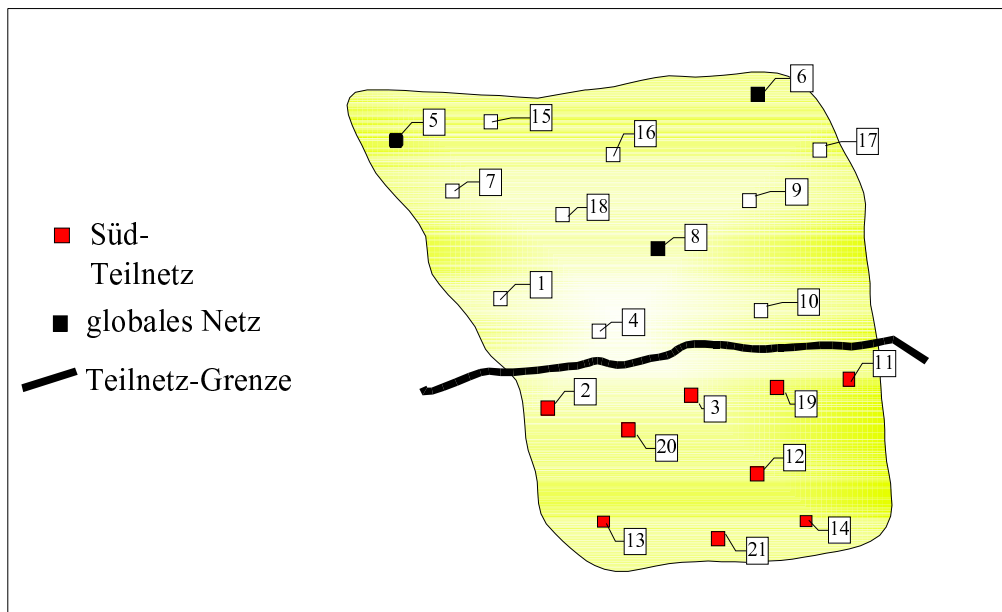


Abbildung 12: Teilnetzes »Süd« mit 3 globalen Punkten

<i>Station</i>	<i>interne Nummer</i>	<i>Name</i>
0002	9002	Belzig
0003	9003	Wünstorf
0011	9011	Frankfurt/O.
0012	9012	Lübben
0013	9013	Herzberg
0014	9014	Cottbus
0019	9019	Storkow
0020	9020	Luckenwalde
0021	9021	Finsterwalde
0005	9005	Perleberg
0006	9006	Prenzlau
0008	9008	Oranienburg

Tabelle 6: Punkte im Subnetz Süd

Da das prinzipielle Vorgehen beim »hierarchischen« Netzaufbau immer gleich ist, wird hier nur das Teilnetz *Nordwest* exemplarisch weiter beschrieben.

5.1.3 Einstellungen im Netz

Die Einstellungen für die Netzlösung mit GNNET waren:

- Elevationsmaske unverändert bei 5°
- Maske für frühestmögliches Fixing bei aufgehenden Satelliten bei 10°

5.1.4 Monitorstation

Als »Prüfling« für eine möglichst durchgreifende Prüfung der Funktionsfähigkeit eignet sich ein RTK-Rover, der mit Korrekturdaten aus dem zu untersuchenden Referenzstationsnetz versorgt wird.

Eine unabhängige Roverstation innerhalb des untersuchten Teilnetzes stand nicht zur Verfügung. Als simulierte Roverstation wurde daher eine Referenzstation verwendet, die weder im globalen Netz noch im untersuchten Teilnetz Nordwest enthalten ist (Tabelle 7).

<i>Station</i>	<i>interne Nummer</i>	<i>Name</i>
0010	0010	Straußberg

Tabelle 7: ausgewählte Monitorstation für Untersuchung im Teilnetz Nordwest

Die Monitorstation wurde als RTK-Rover konfiguriert und mit Korrekturdaten aus dem Teilnetz Nordwest versorgt (Abbildung 13). Wie oben beschrieben, ist für die Erfassung kurzweiliger Fehleranteile die Stationsentfernung zwischen den Referenzstationen wichtig. Für den hier gewählten Rover können die kurzweiligen Anteile hier also nur aus dem globalen Netz und teilweise aus einer Extrapolation des Teilnetzes Nordwest bestimmt werden.

Da die Monitorstation außerhalb des primären Versorgungsbereiches des Teilnetzes Nordwest liegt, sind die Korrekturdaten also unter Umständen etwas schlechter als sie für einen Rover innerhalb des Teilnetzes erwartet werden können.

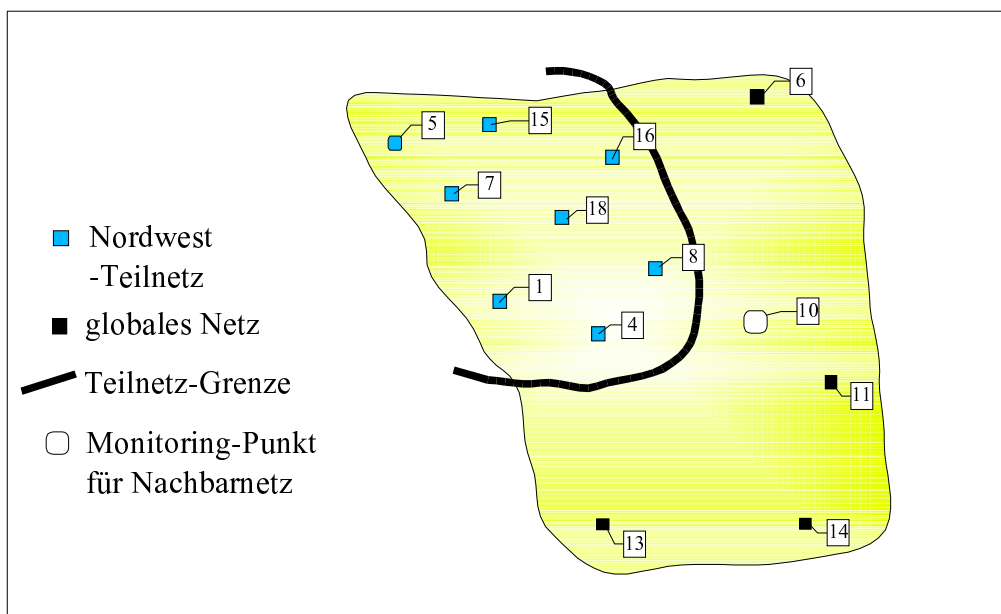


Abbildung 13: Monitoring des Teilnetzes »Nordwest« durch Station 10 (Strausberg)

Umgekehrt kann die Qualität der Korrekturdaten für Punkte innerhalb des Teilnetzes in der Regel als besser angenommen werden als hier für einen außerhalb liegenden Punkt zu erwarten ist.

Als Rover-Software kam GNNET-RTK zum Einsatz.

5.1.5 Einstellungen am Rover (Monitorstation)

Es wurden die üblichen Einstellungen für RTK-Rover gewählt.

- Elevationsmaske 5°

5.2 Ergebnisse Netzberechnung

Die Initialisierung der Mehrdeutigkeiten für aufgehenden Satelliten erfolgte bei in der Regel spätestens bei einer Elevation von 10° . Bei untergehenden Satelliten sind die Mehrdeutigkeiten in der Regel gefixt, die Mehrdeutigkeiten sind daher normalerweise auch bei wesentlich tieferen Elevationen gefixt.

Es konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Initialisierungszeit bei überlappenden Teilnetzen gegenüber hierarchischem Aufbau festgestellt werden, d.h. die »hierarchische« Netzlösung ist trotz der längeren Stationsentfernungen hinreichend schnell.

5.3 Ergebnisse Monitorstation

5.3.1 Genauigkeit

Für die Ost-West-Komponente siehe Abbildung 14.

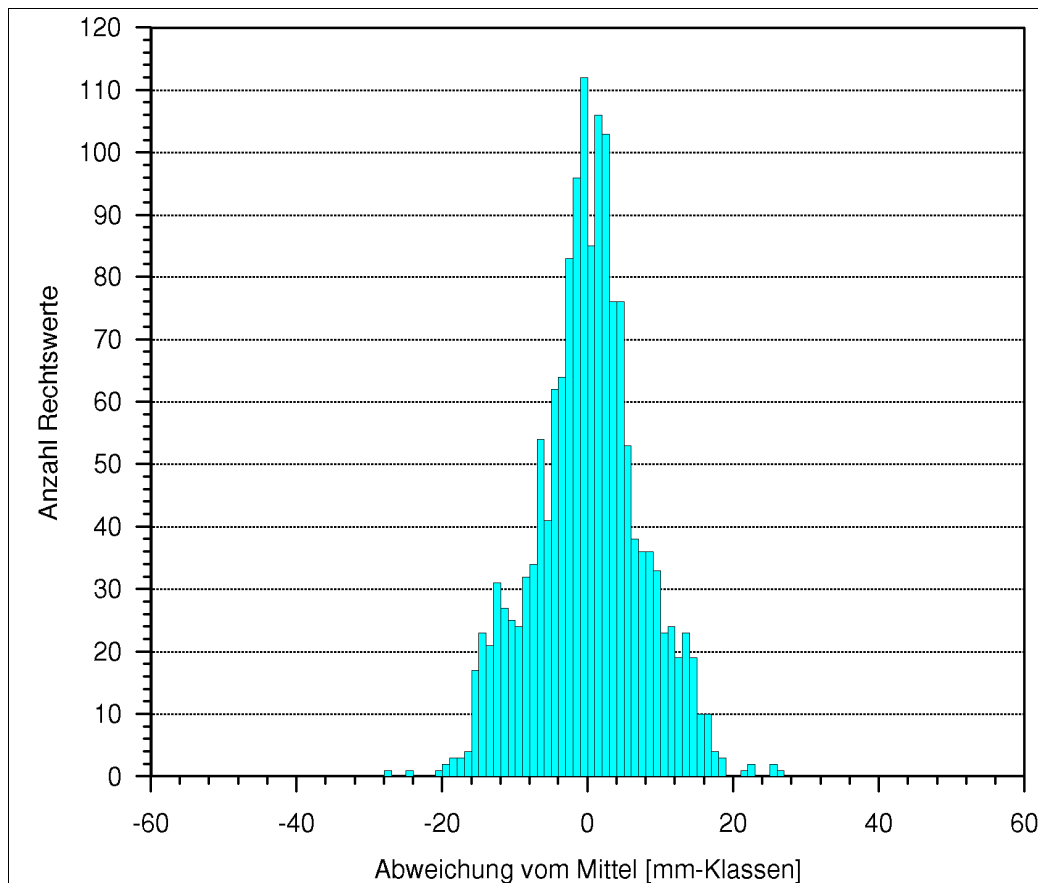


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Positionsfehler (Ost-West-Komponente) für Station Strausberg als Monitorstation, Tag 068. Standardabweichung $\sigma_p=7,4$ mm aus 1544 Lösungen

Die Häufigkeitsverteilung für die Abweichungen in der geographischen Breite zeigt eine recht gute Normalverteilung. Die Standardabweichung ist mit 7,4 mm besser als für den vorgesehenen Anwendungsbereich erforderlich.

Für die Nord-Süd-Komponente siehe Abbildung 15.

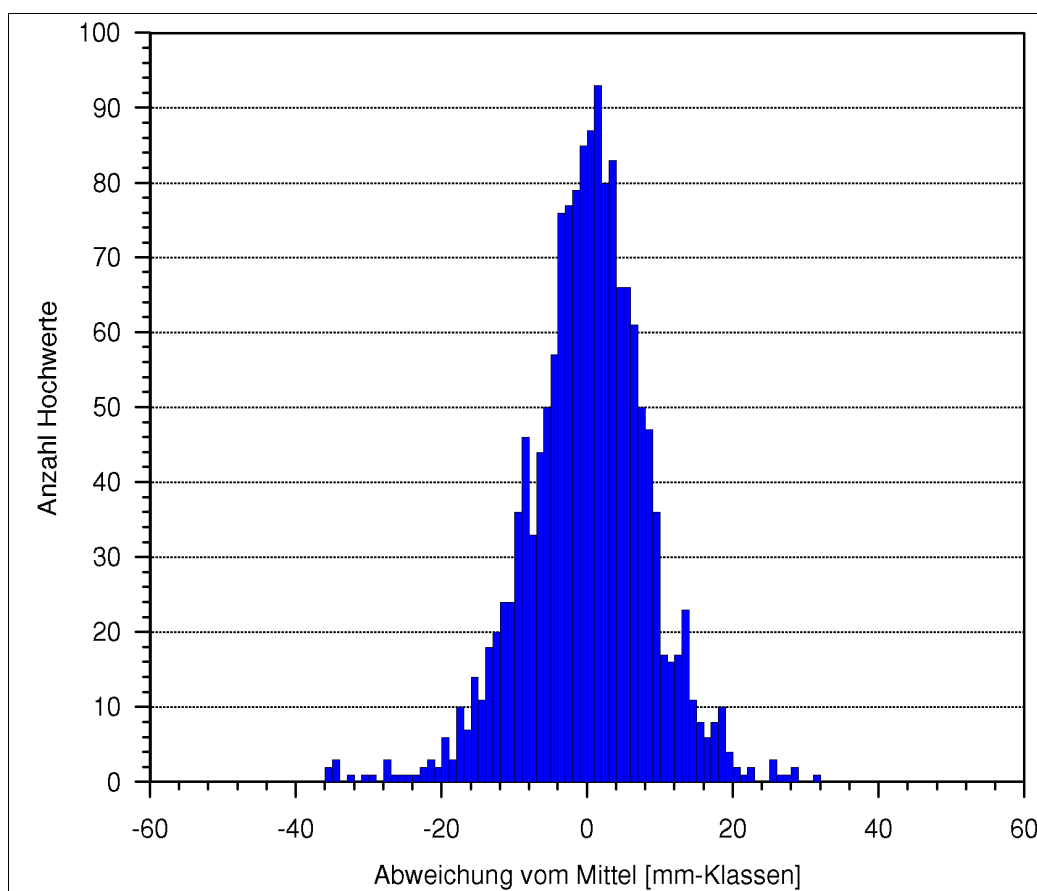


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Positionsfehler (Nord-Süd-Komponente) für Station Strausberg als Monitorstation, Tag 068. Standardabweichung $\sigma_x=8,3$ mm aus 1544 Lösungen

Die Standardabweichung für die geographische Breite liegt mit 8,3 mm erwartungsgemäß etwas über der West-Ost-Komponente, da die Satellitenabdeckung wegen des für unsere Breiten bekannten »Nordlochs« in Nord-Süd-Richtung schwächer ist als in Ost-West-Richtung. Trotzdem ist die Genauigkeit für die vorgesehenen Anwendungen mehr als ausreichend.

Für die Höhenkomponente siehe Abbildung 16.

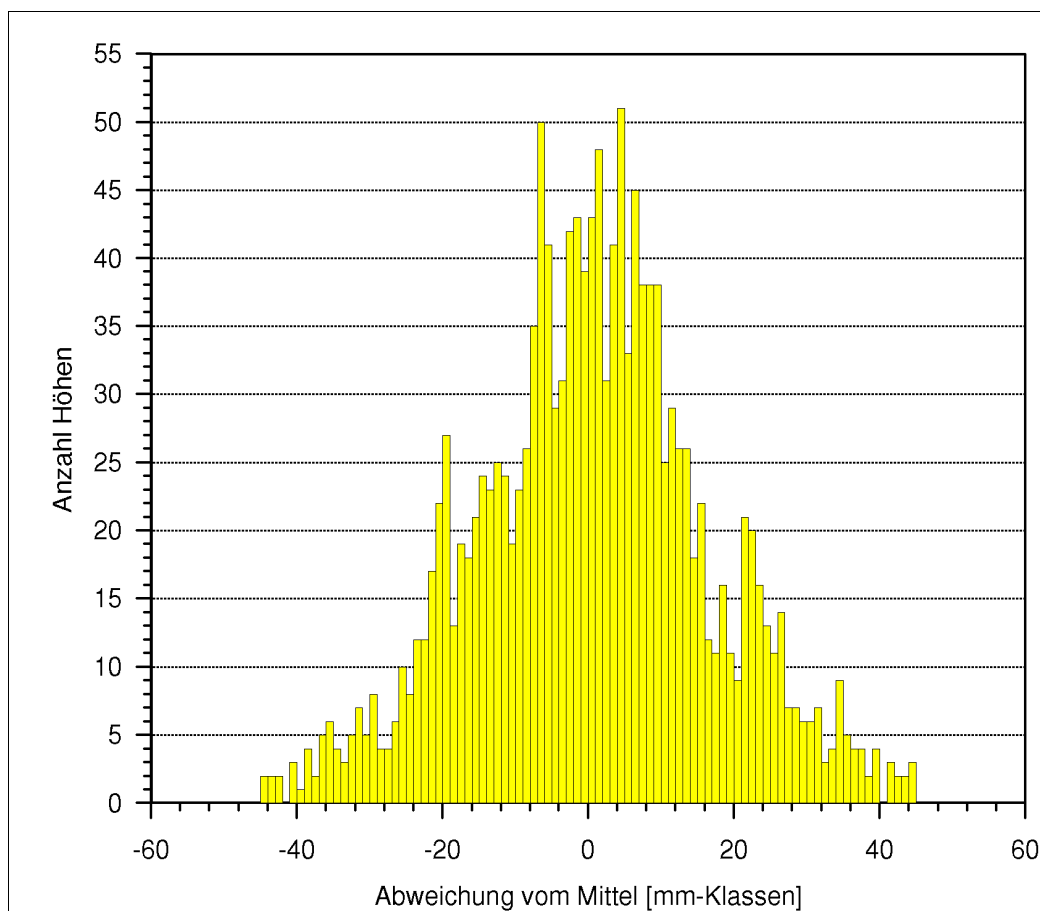


Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Positionfehler (Höhenkomponente) für Station Strausberg als Monitorstation, Tag 068. Standardabweichung $\sigma_h = 17,7 \text{ mm}$ aus 1509 Lösungen

Bei der recht großen Standardabweichung von über 17 mm in der Höhenkomponente spielen vermutlich noch Restfehler, z.B. aus Multipath und Antennen, eine Rolle. Deswegen ist der Höhenfehler etwas größer als man gemeinhin erwarten würde.

Die Verteilung der 2D-Lagefehler und der 3D-Fehler geht aus den folgenden Abbildungen hervor (Abbildungen 17 und 18).

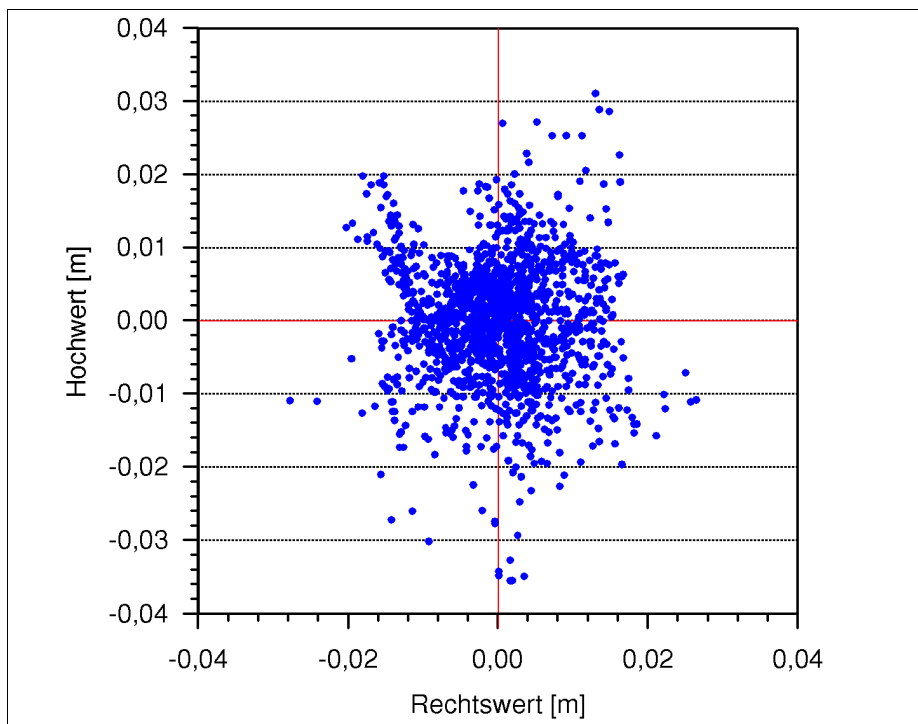


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Positionsfehler (2D-Lagefehler) für Station Strausberg als Monitorstation, Tag 068. Standardabweichung $\sigma_{2D}=11,1 \text{ mm}$ aus 1544 Lösungen

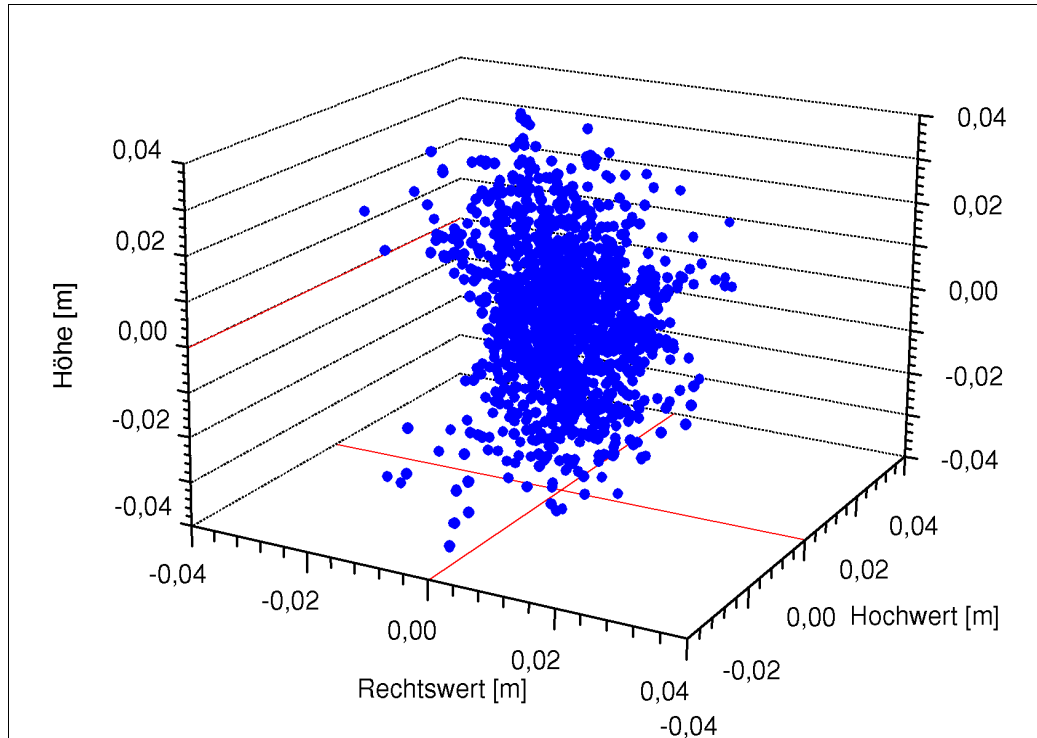


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Positionsfehler (3D-Fehler) für Station Strausberg als Monitorstation, Tag 068. Standardabweichung $\sigma_{3D}=20,9 \text{ mm}$ aus 1498 Lösungen

5.3.2 Initialisierungszeit

Die Untersuchung der Initialisierungszeit brachte gute Ergebnisse (Abbildung 19).

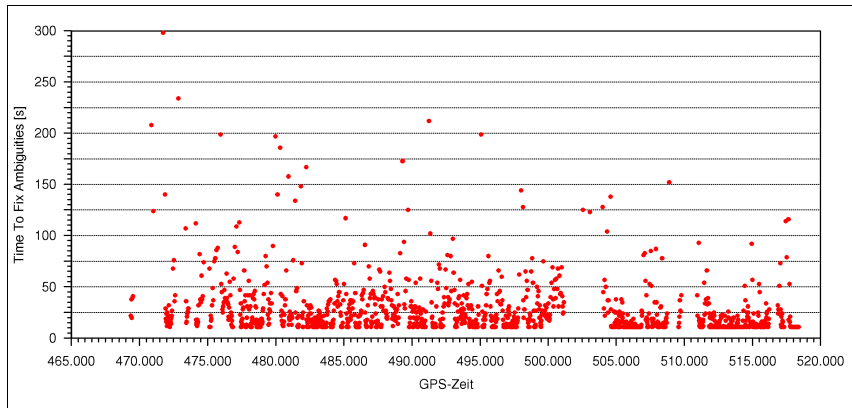


Abbildung 19: Initialisierungszeit

Die minimale Suchdauer war auf 10 Sekunden eingestellt, d.h. der Rover wartet mindestens diese Zeit, bevor eine Mehrdeutigkeit festgesetzt wird. Daher können im Test keine kürzeren Initialisierungszeiten als 10 Sekunden vorkommen.

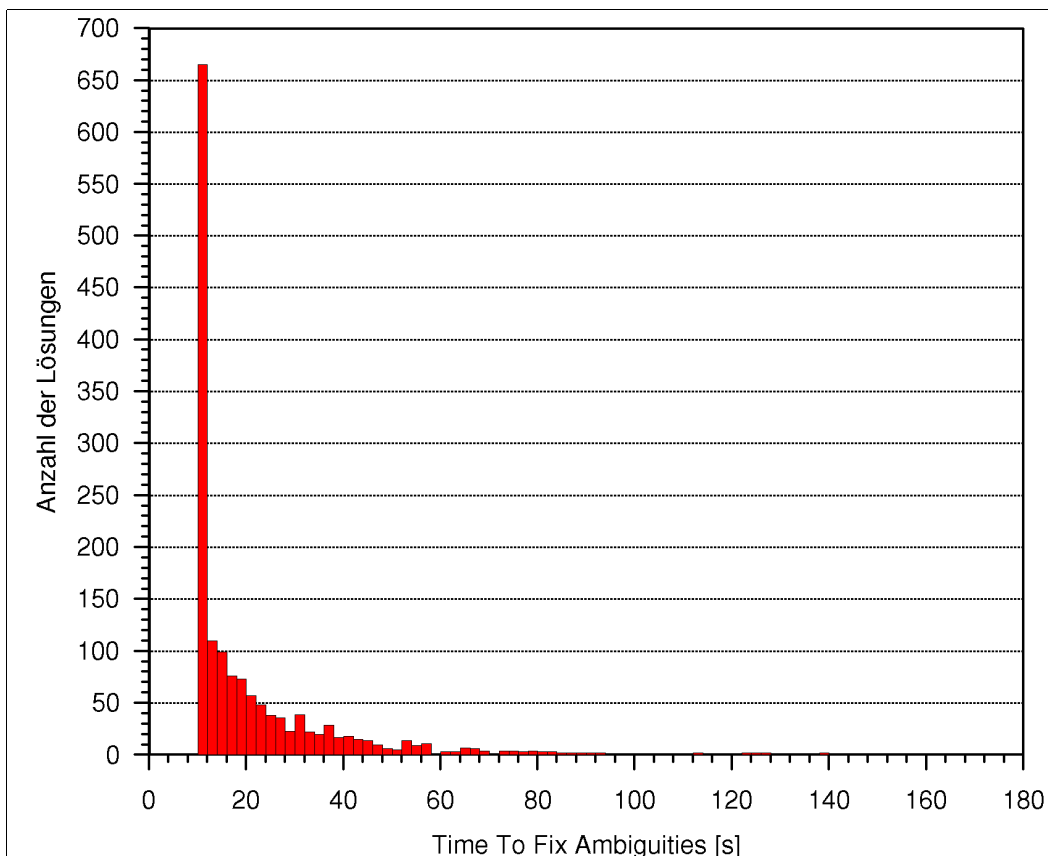


Abbildung 20: Häufigkeitsverteilung der Initialisierungszeiten

Eine bessere Übersicht gibt die Häufigkeitsverteilung der Initialisierungszeiten (Abbildung 20). Die Initialisierung dauerte in etwa 50% der Fälle nicht länger als 15 Sekunden.

5.4 Vergleich

Die erzielten Standardabweichungen sind nicht signifikant schlechter als die, die auch bei optimaler Netzkonfiguration erwartet werden können.

Eine signifikante Verschlechterung der Initialisierungszeiten gegenüber Roverpositionen innerhalb des Teilnetzes konnte nicht festgestellt werden.

Eine interessante zusätzliche Erkenntnis im Hinblick auf die Redundanz des Dienstes ist, dass die Qualität der RTK-Position auch außerhalb des Kernnetzes noch gut bestimmt werden kann. Bei Ausfall eines Teilnetzes kann mithin die Versorgung dieses Netzgebietes in der Regel mit geringen Einschränkungen auch von den beiden übriggebliebenen Teilnetzen übernommen werden.

6 Fazit

Bei der gewählten Netzstruktur mit vorgegebener Anzahl der auf einem Rechner gleichzeitig zu verarbeitenden Stationen und den sich aus den vorgegebenen Stationsstandorten ergebenden Stationsentfernungen ist der »hierarchische« Netzaufbau am besten geeignet.

Dies zeigen sowohl die absolut genommenen Kriterien als auch der Vergleich mit anderen Netzaufbau-Varianten.

Zusammenfassend lassen sich die wesentlichen Vorzüge des »hierarchischen« Netzaufbaus wie folgt charakterisieren:

- gutes Lösungsverhalten hinsichtlich Genauigkeit und Initialisierungsverhalten,
- zusätzlich interessante Möglichkeiten für ein unabhängiges Monitoring,
- erhöhte Redundanz bei Ausfall eines Teilnetzes,
- Skalierbarkeit des Systems bei Hinzunahme weiterer Stationen.

7 Literaturhinweise

Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2001). RTK Network based on Geo++® GNSMART - Concepts, Implementation, Results. Presentation at the International Technical Meeting, ION GPS-01, Salt Lake City, Utah.

Wübbena, G., S. Willgalis (2001). State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks. Presented at International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS-01, Banff, June 5-8, Canada.

- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2001). Absolutkalibrierung: Anforderungen, Aktuelle Absolute Ergebnisse, Anwendungen und Vergleiche. 3. GPS-Antennen-Workshop 2001, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Mai 11, 2001.
- Menge, F., V. Böder, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2001). Absolutkalibrierung: Aktueller Stand und spezielle Anwendungen. 3. GPS-Antennen-Workshop 2001, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Mai 11, 2001.
- Wübbena, G. (2001). Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, Hannover 143-155.
- Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2000). GPS-Referenznetze und internationale Standards. Vorträge des 3. SAPOS-Symposium der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 23.-24. Mai 2000, München, Germany, 14-23.
- Wübbena, G. (1999). GNSMART RTK Lösungen bei starker Sonnenaktivität. AdV, Vortrag zum 2. SAPOS-Symposium, 10-11. Mai 1999, Berlin.
- Wübbena, G. (1998). GNSS-SMART: Echtzeit-GPS genauer als 1 Zentimeter. AdV, Vorträge des 1. SAPOS-Symposiums, 11-12. Mai 1998, Hamburg, 161-172.
- Wübbena, G. (1998). Neue Entwicklungen zur Anlage von Referenzstationsnetzen und Multistations-RTK-Lösungen. Vortrag zu den 7. Leipziger Bildmeßtagen, KAZ Bildmess GmbH, 19.-21. Januar 1998, Leipzig.
- Wübbena, G., A. Bagge (1997). Neuere Entwicklungen zu GNSS-RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit: Referenzstationsnetze und Multistations-RTK-Lösungen. DVW-Seminar GPS-Praxis und Trends '97, 30.9.-1.10.1997, Frankfurt/M., DVW Schriftenreihe 35/1999, Verlag Konrad Wittwer, 73-92.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996). Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1845-1852.
- Wübbena, G., A. Bagge (1995). Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen. Beitrag zum DVW-Praxisseminar DGPS-Anwendungen, 19.-20. September 1995, Hamburg.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber (1995). Developments in Real-Time Precise DGPS Applications - Concepts and Status. Paper presented at the IAG Symposium G1, IUGG General Assembly, July 1995, Boulder, Colorado, USA.
- Wübbena, G., A. Bagge (1995). GPS-bezogene Ortungssysteme. Beitrag zum 37. DVW-Seminar Hydrographische Vermessungen - heute -, 28.-29. März 1995, Hannover. Schriftenreihe des DVW, Band 14, Verlag Konrad Wittwer, 43.