

Netz-RTK¹

Lambert Wanninger
Geodätisches Institut
TU Dresden
D-01069 Dresden
lambert.wanninger@tu-dresden.de

1 Einleitung

Netz-RTK, die cm-genaue GNSS-Echtzeitpositionierung in Netzen von Referenzstationen, wird seit etwa fünf Jahren in der Praxis verwendet und ist inzwischen für weite Bereiche Zentraleuropas und in vielen weiteren Ballungszentren der Welt verfügbar. Beispiele für Deutschland sind der SAPOS-HEPS-Dienst der deutschen Landesvermessungsämter (www.sapos.de) und der ascos-PED-Dienst der Firma E.ON Ruhrgas (www.ascos.de). In den meisten Ländern Europas existieren entsprechende Dienste bzw. befinden sich im Aufbau oder zumindest in der Planung.

In allen diesen Fällen betreibt ein Dienstanbieter ein Netz von Referenzstationen, verarbeitet deren Beobachtungsdaten in Echtzeit vor und bietet die dabei entstandenen Korrekptionsdaten über einen oder mehrere Kommunikationskanäle potentiellen Nutzern an. Diesen gelingt dann mit Hilfe der Korrekptionsdaten des Referenzstationsnetzes die cm-genaue Echtzeitpositionierung im vorgegebenen geodätischen Bezugssystem mit einem einzelnen GPS- oder GPS/GLO-NASS-Empfänger (Rizos 2003, Wanninger 2004).

2 Motivation

Um einen Dienst aufzubauen, der cm-genaue Echtzeitpositionierung mit einem einzelnen GNSS-Empfänger ermöglicht, ist es nicht ausreichend auf die seit

¹ In: „GPS und Galileo – Methoden, Lösungen und neueste Entwicklungen“, 66. DVW-Seminar, Darmstadt, DVW-Schriftenreihe Band 49/2006, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 59-69, 2006

Mitte der 1990er Jahre verfügbare Real-Time Kinematik (RTK)-Technik zu setzen. RTK, also cm-genaue Echtzeitpositionierung auf der Grundlage der Phasendaten mit gelösten Mehrdeutigkeiten, funktioniert nur in einem eng begrenzten Gebiet um eine Referenzstation herum. Die maximal überwindbare Entfernung zwischen Referenzstation und Nutzer beträgt – insbesondere in Abhängigkeit des auf Relativbeobachtungen wirkenden Einflusses der Ionosphäre – zwischen 5 und 20 km. Bei größeren Entfernungen ist keine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung mehr zu erzielen und somit keine cm-genaue Echtzeitpositionierung mehr durchführbar.

Für einen flächendeckenden Dienst ist damit RTK kaum geeignet. Geht man von einem Referenzstationsabstand von 8 km aus, so wären für die Landesfläche von Deutschland ungefähr 6000 Referenzstationen für einen RTK-Dienst notwendig. Schon allein aufgrund der dafür notwendigen Investitionssumme wäre ein wirtschaftlicher Betrieb eines solchen Dienstes nicht möglich.

Erweitert man den RTK-Ansatz aber zu Netz-RTK, d.h. die präzise Positionierung wird dann nicht nur in Bezug auf eine einzelne Referenzstation durchgeführt, sondern in Bezug auf das Netz der umliegenden Referenzstationen (Abb. 1), so kann deren Abstand sehr viel größer ausfallen. Die Erfahrungen in den letzten Jahren zeigen, dass dann ein Referenzstationsabstand von etwa 50 km die Anforderungen der präzisen Echtzeit-Positionierung erfüllt. Somit kann man

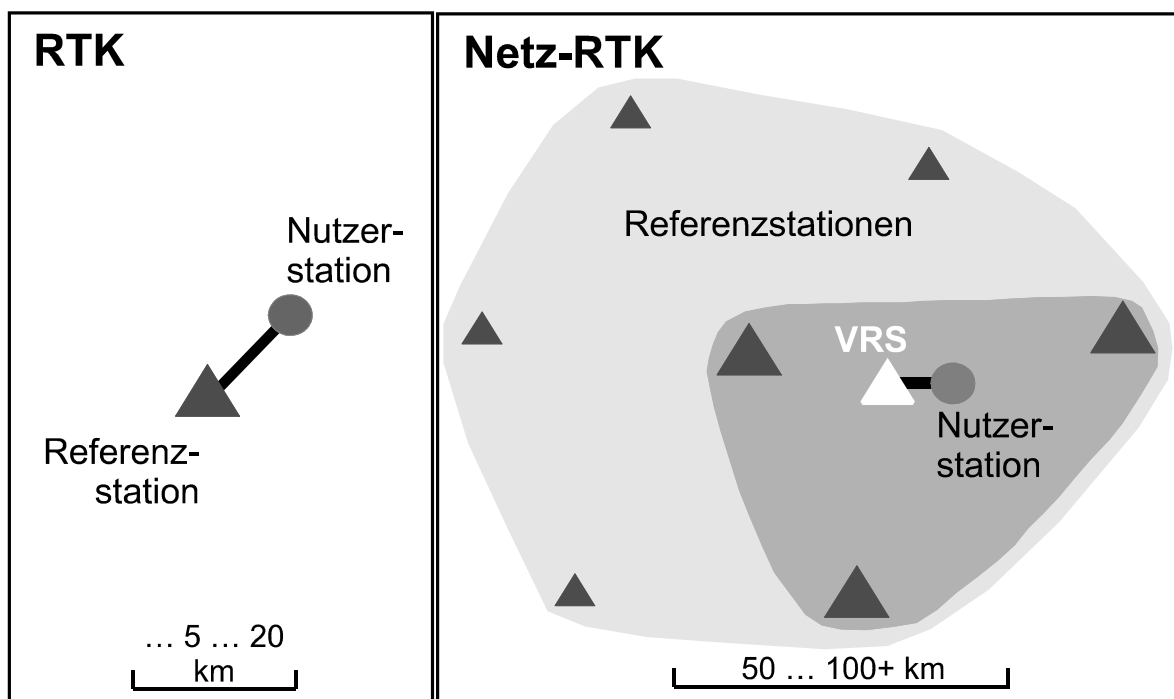


Abb.1 : Grundprinzipien von RTK und Netz-RTK

bei Netz-RTK mit etwa 180 Referenzstationen die Landesfläche Deutschlands abdecken. Zum Vergleich: Das SAPOS-HEPS-Netz besteht aus etwa 250 Stationen, wobei bundesländerspezifische Unterschiede im Referenzstationsabstand existieren. Das ascos-PED-Netz kommt mit etwa 180 Stationen aus.

Während man also bei Netz-RTK im Vergleich zu RTK deutlich weniger Referenzstationen braucht, muss aber andererseits bei Netz-RTK ein größerer Aufwand für die Echtzeit-Aufbereitung der Beobachtungsdaten betrieben werden. Die dafür notwendigen Schritte werden in den nächsten Abschnitten beschrieben.

3 Grundprinzip von Netz-RTK

Die Begrenzung von RTK auf den Nahbereich um die Referenzstation wird durch die bei der relativen Positionierung entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion und der Einflüsse von Orbitfehlern verursacht. Gelingt es, diese relativen Einflüsse in Korrekturmodellen zu erfassen, kann die Reichweite der RTK-Positionierung deutlich vergrößert werden. Die Korrekturwerte sollten eine Genauigkeit von 1 cm und besser aufweisen. Sie können nur aus mehrdeutigkeits-festgesetzten Phasenbeobachtungen hergeleitet werden. Voraussetzung für präzise Korrekturwerte ist somit die (vollständige) Mehrdeutigkeitsfestsetzung im Netz der Referenzstationen.

Die Korrekturmodelle sind so aufgebaut, dass sie die entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse innerhalb des Netzes der Referenzstationen interpolieren. Mit ihrer Hilfe können Korrekturen für beliebige Basislinienvektoren im Gebiet des Referenzstationsnetzes erzeugt werden. Typische Anwendung ist die Berechnung von Korrekturen für die Basislinie zwischen einer gewählten Master-Referenzstation und der (Näherungs-) Position des Nutzers. Bringt man diese Korrekturen an die Beobachtungen der Master-Referenzstation an, so erhält man die Beobachtungen einer Virtuellen Referenzstation (VRS), die der Nutzer dann für die Durchführung seiner präzisen relativen Positionierung verwenden kann.

Präzise Korrekturen setzen in Bezug auf den Einfluss der Ionosphäre und der Orbitfehler eine satellitenindividuelle Modellierung voraus. Für den troposphärischen Einfluss würde auch eine stationsbezogene Modellierung ausreichen.

Zur Vereinfachung werden aber meistens troposphärischer Einfluss und Orbitfehlereinfluss zum nicht-dispersiven (geometrischen) Korrekturterm zusammengefasst und satellitenindividuell behandelt. Die Trennung in disperse (ionosphärischen) und nicht-dispersive Korrekturmodelle hat Vorteile in Bezug auf den notwendigen zeitlichen Aufdatierungsabstand. Da der ionosphärische Einfluss am kurzperiodischsten variiert ist hier eine häufigere Aufdatierung der Korrekturmodelle sinnvoll.

Die minimale Anzahl von Referenzstationen, die für eine flächenhafte Modellierung der entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse notwendig ist, beträgt drei. Stehen mehr Referenzstationen zur Verfügung, so können sie entweder alle gemeinsam zur Bestimmung der Korrekturmodellparameter verwendet werden, oder es werden verschiedene Modelle für Subnetze angesetzt.

4 Datenverarbeitungsschritte

Die für Netz-RTK notwendige Datenverarbeitung ausgehend von den Beobachtungsdaten der Referenzstationen und des Nutzerempfängers bis zu den präzisen Koordinaten des Nutzerantenne lässt sich in folgende Schritte aufteilen (vgl. Abb. 2).

(1) Mehrdeutigkeitsfestsetzung im Netz der Referenzstationen: Hierfür müssen die Beobachtungsdaten der Referenzstationen an einem Ort gesammelt werden. Nach Festsetzung der Doppel-Differenz-Mehrdeutigkeiten der Phasensignale auf beiden Frequenzen befinden sich die Beobachtungen auf demselben Mehrdeutigkeitsniveau. Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung muss in Echtzeit und insbesondere auch für niedrig stehende (aufgehende) Satelliten erfolgreich durchgeführt werden. Dies wird dadurch erschwert, dass recht große Entfernungen zwischen den Referenzstationen zu überwinden sind und somit große ionosphärische und troposphärische Einflüsse vorhanden sein können. Andererseits sind die Koordinaten der Stationen mit hoher Genauigkeit bekannt, welches die Mehrdeutigkeitsfestsetzung deutlich vereinfacht. Trotzdem ist dies der kritischste Schritt in der Datenverarbeitung: nur für solche Beobachtungen, für die die Mehrdeutigkeitslösung erfolgreich durchgeführt werden konnte, können bei der Berechnung der Korrekturmodellparameter berücksichtigt werden. Falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzungen sind unbedingt zu vermeiden.

(2) Bestimmung der Korrekturmodellparameter: Die Korrekturmodelle werden im Allgemeinen satellitenindividuell und mit großer zeitlicher Auflösung angesetzt. Vielfach wird die Modellierung getrennt für ionosphärisch bedingte Einflüsse einerseits und troposphärisch bedingte Einflüsse bzw. Orbitabweichungen andererseits vorgenommen. Eine Reihe von Ansätzen zur Modellierung (also Interpolation) der entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse wurde in den vergangenen Jahren entwickelt und getestet (siehe Fotopoulos und Cannon 2001, Dai u.a. 2003). Für die sehr einfache und vielfach ausreichende Netzkonfiguration von genau drei Referenzstationen, der kleinstmöglichen Anzahl für eine flächenhafte Modellierung, liefern die verschiedenen Ansätze Ergebnisse von ähnlicher Qualität. Für eine größere Anzahl von Referenzstationen oder im Falle einer Extrapolation über das Gebiet der Referenzstationen können sich

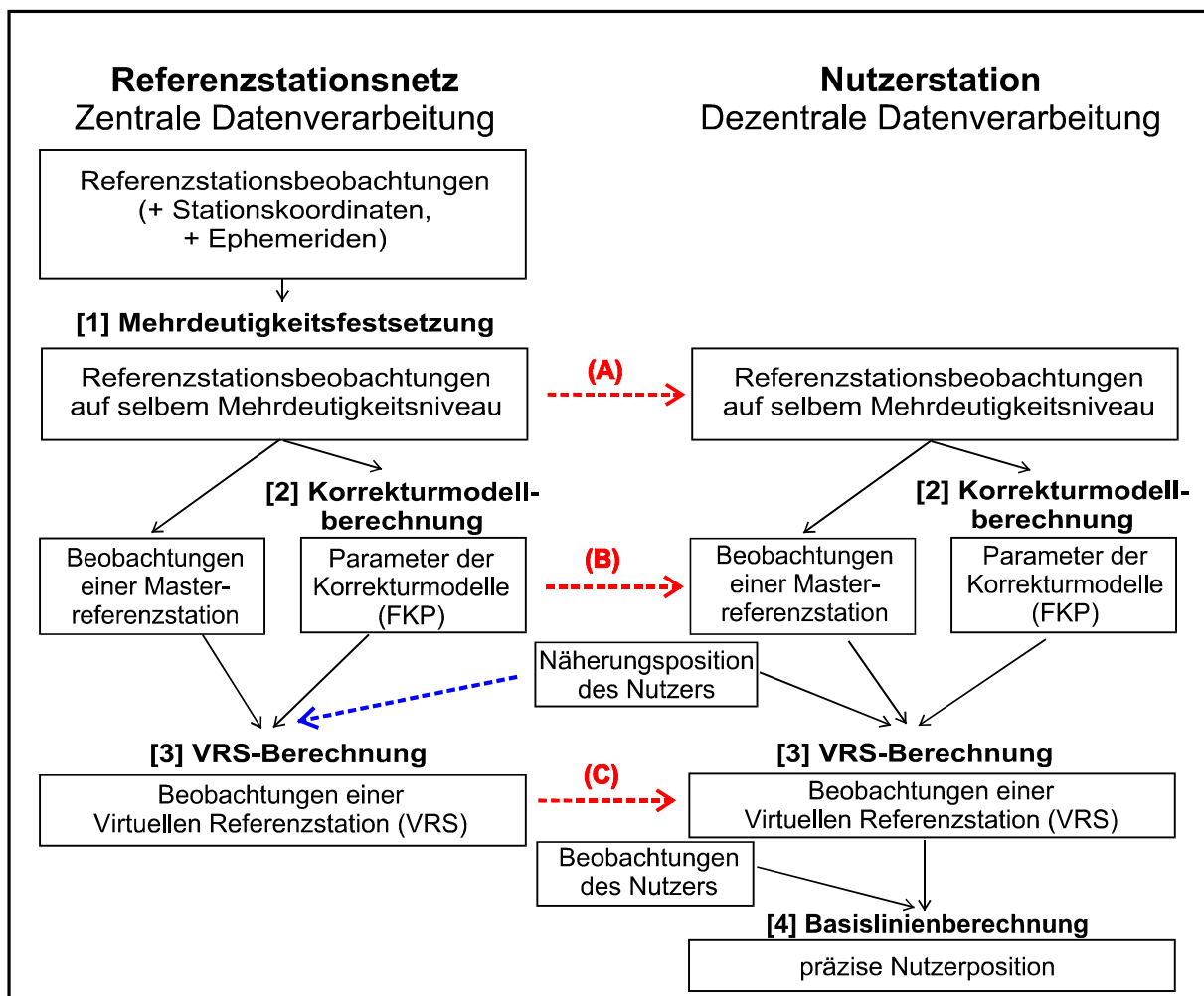


Abb. 2: Netz-RTK-Berechnungsschritte und ihre Verteilung zwischen zentraler und dezentraler Datenverarbeitung

dagegen z.T. große Unterschiede ergeben. Stark verbreitet ist der flächenhafte lineare Interpolationsansatz. Die Parameter der dabei entstehenden Modelle werden als Flächenkorrekturparameter (FKP) bezeichnet.

(3) VRS-Berechnung: Auf der Grundlage der Korrekturmodellparameter können dann individuelle Korrekturen für Basislinien innerhalb des Referenzstationsnetzes berechnet werden. Im Allgemeinen wählt man dafür die Basislinie zwischen einer Master-Referenzstation (z.B. die nächstgelegene Referenzstation) und der Nutzerstation, für die Näherungskordinaten vorliegen. Werden diese Korrekturen für entfernungsabhängig wirkende Einflüsse an die Pseudostreckenkorrekturen der Master-Referenzstation angebracht, so wird diese fiktisch auf die (Näherungs-) Position des Nutzers verschoben und dann als Virtuelle Referenzstation (VRS) bezeichnet. Sie kann entweder in der Form von Pseudostreckenkorrekturen oder in der Form vollständiger Beobachtungen zur Verfügung gestellt werden. Es ist auch möglich, die Korrekturen (mit umgekehrtem Vorzeichen) an die Beobachtungen der Nutzerstation anzubringen. Da dieser Ansatz in seiner Wirkung auf die Basislinie zwischen Master-Referenzstation und Nutzerstation identisch ist, soll hier nur der VRS-Ansatz weiter diskutiert werden.

(4) Basislinienberechnung: Im letzten Schritt erfolgt die Berechnung der Basislinie zwischen Virtueller Referenzstation und Nutzerstation. Nach der Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten ergeben sich cm-genaue Koordinaten.

5 Verwirklichungskonzepte

Es existieren verschiedene Verwirklichung des Netz-RTK-Ansatzes, die sich insbesondere in der Aufteilung der Datenverarbeitungsschritte (2) und (3) zwischen zentraler Datenverarbeitung in der Rechenzentrale eines Referenzstationsnetzes und der dezentralen Verarbeitung im Nutzerempfänger unterscheiden (vgl. Abb. 2). Diese unterschiedliche Aufteilung der Datenverarbeitungsschritte hat direkte Auswirkungen auf die zwischen Rechenzentrale und Nutzer zu übermittelnde Daten in Bezug auf deren Inhalt, Volumen, verwendbarem Format und geeigneten Kommunikationskanälen.

(A) Master-Auxiliary-Konzept: Hierbei erfolgt die Übertragung der Netzinformationen in der Form von Referenzstationsbeobachtungen, die im Vorverarbeitungsschritt auf dasselbe Mehrdeutigkeitsniveau gebracht wurden (Euler u.a.

2004). Somit wird der kritischste Arbeitsschritt in der Zentrale durchgeführt, also dort, wo die meisten Vorinformationen (insbesondere vorangegangene Beobachtungen oder daraus abgeleitete Produkte) vorliegen. Die Bezeichnung des Konzeptes leitet sich aus der Methode ab, mit der diese Referenzstationsbeobachtungen übermittelt werden: die Beobachtungen der Masterstation in der Form vollständiger Korrekturen, dagegen die Beobachtungen aller weiterer Referenzstationen (Auxiliary-Stationen) als Korrekturdifferenzen zur Masterstation, um das Datenvolumen gering zu halten. Bei diesem Konzept ist es der Software im Nutzerempfänger freigestellt, in welcher Form er Korrekturen für seinen Standort interpoliert und welche Auxiliary-Stationen sie dafür verwendet. Dieser Interpolationsvorgang ist nur wenig rechenintensiv und kann somit problemlos im Nutzerempfänger durchgeführt werden. Als Datenformat für die Übermittlung sind spezielle Datensätze innerhalb des RTCM 3.0 (RTCM 2004a) vorgesehen. Sie befinden sich augenblicklich noch in der Erprobungsphase und sind somit noch nicht endgültig freigegeben.

(B) FKP-Konzept: Neben den Beobachtungen (oder Korrekturen) für eine Master-Referenzstation werden die Netzinformationen in der Form der Parameter der Korrekturmodelle übertragen. Der Interpolationsansatz wird also durch die Zentrale festgelegt und ist auch durch das verwendete Datenformat nicht mehr frei veränderbar. Das für die Übertragung der Flächenkorrekturparameter (FKP) notwendige Datenformat ist nicht international standardisiert. Es existiert aber eine Übereinkunft der Gerätehersteller und Softwareentwickler bezüglich eines Datensatzes vom Typ 59 (*proprietary message*) für die RTCM-Version 2.3, der die FKP-Parameter enthält (Wübbena u.a. 2001). Die Übertragung aller notwendigen Informationen von der Zentrale zum Nutzer kann also mit Hilfe des RTCM-Formats Version 2.3 (RTCM 2001) erfolgen. Vom Grundprinzip her wäre es bei diesem Verfahren ausreichend, Daten nur in eine Richtung auszusenden. In der Praxis wird dieses Konzept aber so angewandt, dass der Nutzer seine Näherungsposition mitteilen muss (z.B. im NMEA-Format), damit in der Zentrale die nächstgelegene Referenzstation als Master-Referenzstation ausgewählt und so der richtige Datenstrom übermittelt werden kann.

(C) VRS-Konzept: Hierbei ist es zwingend erforderlich, dass der Nutzer der Zentrale seine Näherungsposition mitteilt (z.B. im NMEA-Format), so dass dort ein Datenstrom zusammengestellt werden kann, der die Beobachtungen (oder Korrekturen) der individuellen Virtuellen Referenzstation (VRS) enthält. Als Übertragungsformate kommen alle RTK-Formate in Frage, also insbesondere RTCM-Versionen 2.3 und 3.0 (RTCM 2001, 2004a). Dieses Verfahren ist das

Tab. 1: Vergleich der Konzepte

Konzept	Informationsgehalt	Datenvolumen	Verfügbarkeit der Netz-Korrekturen	Datenformate	Netz-RTK Empf.-software
(A) Master-Auxiliary	++	noch größer	bei Aufschaltung ggf. leicht verzögert	zukünftiges RTCM 3.0	ja
(B) FKP	+	etwas größer	bei Aufschaltung ggf. leicht verzögert	RTCM 2.3, 3.0 + zusätzlicher Datensatz	ja
(C) VRS	Minimum	Minimum	sofort	RTCM 2.3 oder 3.0	nein

heute am weitesten verbreitete. Es hat insbesondere den Vorteil, dass keine bedeutenden Softwareveränderungen im Nutzerempfänger notwendig sind, um mit VRS-Daten zu arbeiten (vgl. Tab. 1). Andererseits können hierbei – aufgrund der Beschränkungen durch die Datenformate – keine Zusatzinformationen über die Qualität der Interpolation und damit der Qualität der VRS-Beobachtungen mitgeliefert werden. Dies kann die Mehrdeutigkeitslösung in der Basislinie zwischen VRS und Nutzer erschweren.

Weitere wichtige Unterschiede zwischen den drei Verfahren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der zur Verfügung gestellte Informationsgehalt und damit auch das notwendige Datenvolumen steigern sich von VRS über FKP bis zum Master-Auxiliary-Verfahren. In Abhängigkeit davon wie häufig die Korrekturen der Auxiliary-Stationen oder die FKP-Netzkorrekturen tatsächlich ausgesendet werden, kann es bei den Verfahren (A) und (B) bei einer Neuaufschaltung eines Nutzer zu einer leichten Verzögerung in der Mehrdeutigkeitslösung und damit der präzisen Positionierung kommen.

Welches Verfahren sich auf Dauer durchsetzen wird, scheint augenblicklich nur wenig von den (relativ geringen) technischen Qualitätsunterschieden zwischen den Verfahren abzuhängen. Da jedes dieser Verfahren von einem anderen Anbieter bevorzugt wird (das Master-Auxiliary-Konzept von Leica (www.leica-geosystems.com), das FKP-Konzept von Geo++ (www.geopp.com) und das VRS-Konzept von Trimble (www.trimble.com)) spielen hier Marktmacht und Marketingaspekte eine große Rolle.

6 Datenübertragung

Datenkommunikationsaspekte sind bei Netz-RTK von großer Bedeutung. Echtzeit-Datenübertragung muss zum einen zwischen den Referenzstationen und der zentralen Rechenstelle stattfinden und zum anderen zwischen der Zentrale und den mobilen Nutzern im Felde (Abb. 3).

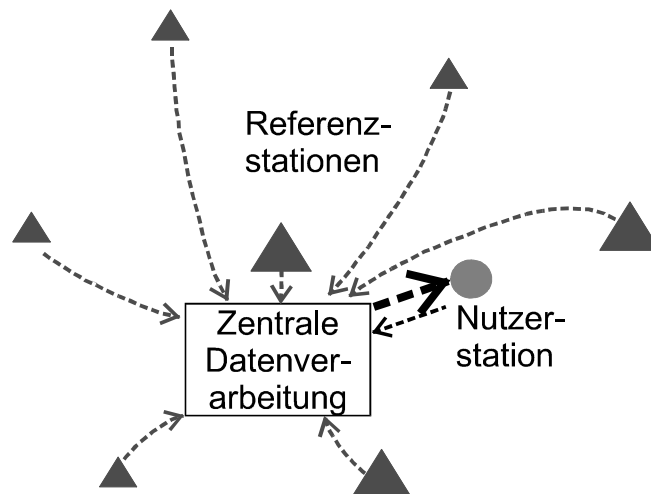


Abb. 3: Notwendige Datenkommunikation

Während für die Datenübertragung von den Referenzstationen zur Zentrale ursprünglich vielfach Telefonstandleitungen Verwendung fanden, übermittelt man inzwischen eher paketorientiert über schnelle (und kostengünstige) Internetverbindungen. Die Datenübertragung zum Nutzer gestaltet sich schwieriger, da dieser meistens mobil ist. Die in Deutschland innerhalb von SAPOS in den 1990er-Jahren diskutierten Funklösungen mit Frequenzen im 2 m-Band haben sich im Binnenland nie durchgesetzt, werden aber im Küstenbereich genutzt. Als gängige Kommunikationstechnik hat sich das Mobiltelefon im GSM-Standard etabliert. Es erlaubt große Datenübertragungsraten und auch bidirektionale Kommunikation.

Eine Erweiterung des GSM-Standards wurde vor wenigen Jahren unter der Abkürzung GPRS eingeführt. Die damit mögliche Abrechnung über Datenvolumen anstatt Verbindungszeit führt insbesondere bei Verwendung des RTCM Version 3.0-Datenformats zu deutlich günstigeren Kommunikationskosten. Es ermöglicht auch die Verbindung von Internet-Protokoll und Mobiltelefon. Zur Übertragung von GNSS-Korrekturdatenströmen wird dabei das Ntrip-Protokoll (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol, BKG 2005) verwendet, mit

dem sich Daten in allen denkbaren Formaten – nicht nur RTCM – verpacken und über das Internet verschicken lassen. Ntrip ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation zwischen Dienstanbieter und Nutzer. Das Ntrip-Protokoll wurde vom RTCM-Komitee 104 als Standard definiert (RTCM 2004b).

Nachteil der GSM/GPRS-Technik ist die unvollständige Abdeckung insbesondere der dünner besiedelten Gebiete. Alternative Kommunikationsverfahren, die unter den zahlreichen zu beachtenden Aspekten mit GSM/GPRS konkurrieren können, sind aber augenblicklich für Deutschland nicht zu erkennen.

Weitere Informationen zu den verschiedenen Möglichkeiten der Datenübertragung bei Netz-RTK findet man in Wegener und Wanninger (2005).

7 Grenzen und Zukunft von Netz-RTK

Die Grenzen von Netz-RTK wurden während des letzten Maximums der Sonnenaktivität in den Jahren 2000-2002 deutlich. Bei für relative GNSS-Positionierung extremen ionosphärischen Verhältnissen, wie sie in mittleren Breiten insbesondere in den Tageslichtstunden der Wintermonate in Jahren starker Sonnenaktivität zu beobachten sind, treten vermehrt Probleme bei der Mehrdeutigkeitsfestsetzung im Netz der Referenzstationen auf. Als Konsequenz liegen dann für weniger Satellitensignale präzise Korrekturen sowohl für die ionosphärisch wie auch die geometrisch wirkenden Einflüsse vor. Weiterhin verstärken sich die ionosphärischen Restfehler in der Basislinie zwischen VRS und Nutzer, da die ionosphärischen Einflüsse aufgrund ihrer Kleinräumigkeit nur noch unvollständig erfasst werden können (Wanninger 1999). Bei solchen extremen ionosphärischen Verhältnissen sind die Referenznetze im Vorteil, die einen kleineren Referenzstationsabstand besitzen.

Auch in Zukunft bei gemeinsamer Auswertung von GPS und Galileosignalen wird man trotz verdoppelter Satellitenanzahl nicht auf regionale Referenzstationsnetze verzichten können. Die satellitenindividuelle Modellierung insbesondere des ionosphärischen Einflusses verbessert die Mehrdeutigkeitsfestsetzung in der Basislinie zum Nutzer hin. Sie wird beschleunigt und gleichzeitig zuverlässiger.

Auf die Betreiber und Nutzer der Netz-RTK-Dienste kommen in den nächsten Jahren große Umstellungen aufgrund der Weiterentwicklung der GNSS-Positio-

nierung zu. Die gesamten Systeme von Netz-RTK, angefangen von den Referenzstationen über Software in der Rechenzentrale und Datenformaten bis zur Basislinienauswertung im Nutzer-Empfänger müssen auf die dann zusätzlich zu Verfügung stehenden Signale des modernisierten GPS, des neu hinzukommenden Galileo und ggf. auch des GLONASS eingerichtet werden.

Literatur

- BKG (2005): Ntrip-Internetseite des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt: http://igs.ifag.de/index_ntrip.htm
- Dai, L., Han, S., Wang, J., Rizos, C. (2003): Comparison of Interpolation Algorithms in Network-Based GPS Techniques. *Journal of the Institute of Navigation*, 50:277-293.
- Euler, H.-J., Seeger, S., Zelzer, O., Takac, F., Zebhauser, B.E. (2004): Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages. *Proc. of ION NTM 2004*, 453-461.
- Fotopoulos, G., Cannon, M.E. (2001): An Overview of Multiple-Reference Station Methods for cm-level Positioning. *GPS Solutions*, Band 4, Heft 3, 1-10.
- Rizos, C. (2003): Network RTK Research and Implementation – A Geodetic Perspective. *Journal of Global Positioning Systems*. Band 1, Heft 2, 144-150.
- RTCM (2001): RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Version 2.3. RTCM-Veröffentlichung 136-2001/SC104-STD.
- RTCM (2004a): RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Version 3.0. RTCM-Veröffentlichung 30-2004/SC104-STD.
- RTCM (2004b): RTCM Recommended Standards for Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), Version 1.0, RTCM-Veröffentlichung 200-2004/SC104-STD.
- Wanninger, L. (1999): The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-Networks under Solar Maximum Conditions. *Proc. of ION GPS 99*, 1419-1427.
- Wanninger, L. (2004): Introduction to Network RTK. IAG-Working Group 4.5.1: Network-RTK, <http://www.network-rtk.info>.
- Wegener, V., Wanninger, L. (2005): Communication Options for Network RTK. IAG-Working Group 4.5.1: Network-RTK, <http://www.network-rtk.info>.
- Wübbena, G., Bagge, A. (2002): RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP, Version 1.0, Geo++ White Paper 2002.01.