Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 93 (1995)

Heft: 4: ETHZ : Departement Geodätische Wissenschaften = EPFZ : Département des sciences géodésiques

Artikel: Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometrie für hochgenaue Messungen mit GPS

Autor: Bürki, B. / Kahle, H.-G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-235152

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometrie für hochgenaue Messungen mit GPS

B. Bürki, H.-G. Kahle

Die Genauigkeit der Höhenbestimmung mit GPS ist unter anderem durch die Refraktion in der Troposphäre begrenzt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der Wasserdampfgehalt. Da dieser Parameter zeitlich und örtlich starke Variationen aufweist, lässt er sich nur mit grossem Aufwand und relativ ungenau modelllieren. Die im Rahmen eines ETH-Forschungsprojektes entwickelten Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometer sind geeignet, durch passive Messung auf 23.8 GHz und 31.5 GHz den Wasserdampfgehalt direkt im Feld zu messen und daraus die Weglängenvergrösserung, die man als Path Delay bezeichnet, zu rechnen. Neben den theoretischen Apsekten werden zwei praktische Anwendungen im Rahmen internationaler Projekte vorgestellt und diskutiert, in denen zur Erreichung der bestmöglichen Höhengenauigkeit die IGP-Radiometer eingesetzt werden.

La précision de la mesure altimétrique, au moyen du GPS, est limitée, entre autre, par la réfraction dans la troposphère. La teneur en vapeur d'eau y joue un rôle déterminant. Etant donné que ce paramètre varie fortement en fonction du lieu et du temps, sa modélisation est assez imprécise et demande une importante mise en œuvre de moyens. Les radiomètres à microondes, développés dans le cadre d'un projet de recherche de l'EPF, sont aptes, au moyen de la mesure passive des fréquences 23,8 GHZ et 31,5 GHZ, a déterminer directement dans le terrain la teneur en vapeur d'eau et d'en calculer l'augmentation de la distance du chemin parcouru (méthode path delay). A part les aspects théoriques, l'auteur présente et discute deux applications pratiques dans le cadre de projets internationaux où l'on utilise des radiomètres IGP afin d'obtenir la meilleure précision d'altitude possible.

La precisione di determinazione dell'altezza con i GPS è, tra l'altro, limitata dalla rifrazione nella troposfera. A questo riguardo, un ruolo essenziale è svolto dal tenore di vapore acqueo. Questo parametro può essere modellato solo con grandi difficoltà e rimane relativamente impreciso dato che presenta marcate variazioni temporali e locali. I radiometri a vapore acqueo e microonde, sviluppati nel quadro di un progetto di ricerca dell'ETH, sono adatti – tramite la misurazione passiva a 23,8 Ghz e 31,5 Ghz – a misurare direttamente sul terreno il tenore di vapore acqueo e a calcolare il ritardo di percorso, chiamato anche «path delay». Oltre agli aspetti teorici, si illustrano e discutono anche due applicazioni pratiche nell'ambito di progetti internazionali che hanno usato i radiometri IPG per raggiungere la migliore precisione nella determinazione delle altezze.

1. Einleitung

Die Positionierung mit GPS-Satelliten ermöglicht heute relativ hohe Genauigkeiten. Allerdings sind diese Genauigkeiten nur dann errreichbar, wenn die stochastischen und systematischen Fehleranteile entsprechend zuverlässig modelliert werden. Die wichtigsten systematischen Fehler werden einerseits durch die von der Sonnenaktivität stark beeinflusste Zone der Erdatmosphäre zwischen 350 km und 80 km Höhe, die Ionospähre, hervorgerufen. Anderseits spielen die wechselhaften und schwer modellierbaren Ausbreitungsbedingungen in den unteren 10 km der Lufthülle, die man als Troposphäre bezeichnet, eine massgebende Rolle. Aus physikalischen Gründen können die troposphärischen Störungen in zwei Anteile zerlegt werden: den Trocken- und den Feuchtanteil. Der Trockenanteil ist im wesentlichen eine Funktion der Druckverteilung und lässt sich durch genaue Messung des Luftdrucks gut bestimmen. Der Feuchtanteil ist dagegen örtlich und zeitlich stark variierend und deshalb mit Modellansätzen nicht mit genügender Genauigkeit erfassbar. Die Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometrie ist eine Methode, die sich dazu eignet, diesen Feuchtanteil mit hoher Auflösung zu bestimmen [Elgered et al., 1991, Peter und Kämpfer, 1992, Ware et al., 1993]. Im vorliegenden Aufsatz wird die radiometrische Methode vorgestellt. Zudem beschreiben wir Arbeiten, die im Rahmen des ETH-Forschungsprojektes «Entwicklung von Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometern für geodätische Satellitenmessungen mit GPS» in den letzten Jahren im Geodäsie- und Geodynamik Labor (GGL) des IGP durchgeführt wurden. Das Projekt ermöglichte die Konstruktion von Hard- und Software, mit der ein Beitrag zur Verbesserung der erreichbaren Messgenauigkeit auf dem Gebiet der hochpräzisen GPS-gestützten Positionierung, insbesondere der Höhenkomponente, geleistet werden kann [Bürki et al., 1992]. Abschliessend berichten wir über die Anwendung dieser Technik anhand zweier aktueller Forschungsprojekte auf europäischer Ebene (ESA, EU).

2. Das Verfahren der Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometrie: Theoretische Grundlagen

Während man den Ionosphäreneinfluss durch Beobachtung auf zwei Frequenzen (L_1 = 1.57542 GHz, L_2 = 1.22760 GHz) genügend genau eliminieren kann [s. z.B. Wild, 1994], müssen zur Erfassung des troposhärischen Effekts ungleich grössere Anstrengungen unternommen werden (vgl. auch Aufsatz Geiger et al.). Neben den optischen Richtungs- und Distanzmessungen sind es vor allem die Mikrowellen-Messungen, bei denen die Refraktion eine entscheidende Rolle spielt [Elgered, 1992]. Die Refraktion, die zu einer Weglängenvergrösserung (englisch «Path length excess» oder «path delay») führt, ist dabei von zwei Grössen abhängig:

- Der Dichte der trockenen Luft.
- Dem Wasserdampfgehalt in der Luft.

Der totale Path Delay wird in zwei Anteilen ausgedrückt:

$$\Delta s_{total} = \Delta s_{dry} + \Delta s_{wet}$$

Δs_{dry} wird als Trockenanteil und Δs_{wet} als Feuchtanteil bezeichnet. Obwohl der Trockenanteil ca. 2,30 m erreicht, ist er zuverlässig modellierbar, da er in erster Näherung nur vom Luftdruck P abhängt:

$$\Delta s_{dry}\ [cm] = 0.2277\ P\ [hpa]$$

Grössere Probleme bietet der Feuchtanteil, der zwar nur die Grössenordnung von 1 bis gegen 40 cm erreicht, aber infolge seiner Natur stark mit kurzzeitig vorüberziehenden Wetterfronten korreliert ist [Davis et al., 1992]. Die Nichtberücksichtigung dieser Systematik wirkt sich vor allem auf die Höhengenauigkeit der Stationskoordinaten aus, die gegenüber der Lagegenauigkeit um den Faktor 2 bis 3 geringer ist.

Durch direkte Messung des Wasserdampfgehalts kann der Feuchtanteil des Path Delays (der Einfachheit halber in der Folge als «Path Delay» bezeichnet) bestimmt und bei der Auswertung der GPS-Messungen in Rechnung gesetzt

werden. Dazu benutzt man passiv arbeitende Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometer, die die von der Troposphäre emittierte Strahlung in zwei abgestimmten Frequenzen messen. Daraus lassen sich der Wasserdampfgehalt und schliesslich die Weglängenverzögerung bestimmen [Elgered et al., 1991, Johannsson et al., 1993]. Derartige Geräte sind seit geraumer Zeit bei einigen grossen Radioteleskopen im Einsatz, wo mit der VLBI-Technik[1] hochgenaue Basislinien bis zu mehreren Tausend Kilometern Länge für geodätisch/geodynamische Anwendungen vermessen werden. Die stationären Radiometer sind aber gross und schwer. Sie eignen sich nicht für den gezielten Feldeinsatz. Die in diesem Bericht dokumentierten transportablen Radiometer des IGP sind, dank ihres geringen Gewichts, praktisch überall im Feld einsetzbar, was die Messung des Path Delays gezielt am Standort der GPS-Empfänger ermöglicht. Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, ist der Path Delay in direktem Mass vom Wasserdampfgehalt abhängig. Anderseits ist die von den Wasserdampf-Molekülen abgestrahlte Energie direkt proportional zum integrierten Wasserdampfgehalt. Man kann deshalb das Messprinizip von Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometern (WVR) folgendermassen zusammenfassen:

Der Wasserdampfgehalt kann durch passive Messung der von der Troposphäre abgestrahlten Strahlungsenergie (Helligkeitstemperatur) in zwei Frequenzen bei 23,8 GHz und bei 31,5 GHz bestimmt werden.

Aus dem gemessenen Wasserdampfgehalt kann schliesslich der Path Delay berechnet werden.

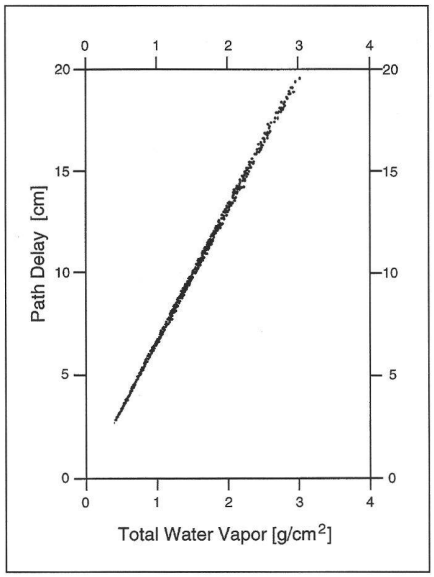

Abb. 1: Zusammenhang zwischen dem totalen Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre und der dadurch entstehenden Verlängerung (sog. Path Delays) der gemessenen Distanzen zu den Satelliten, die in Extremfällen ca. 40 cm erreichen können.

Die Strahlungs-Transportgleichung beschreibt die am Boden detektierbare Helligkeitsstrahlung:

$$T_B = T_C \cdot e^{-\tau(\infty)} + \int_0^\infty T \cdot \alpha^{-\tau(s)}\, ds \qquad (1)$$

mit der optischen Tiefe:

$$\tau(s) = \int_0^s \alpha\, ds$$

α = Absorptionskoeffizient
s = Distanz entlang dem Ausbreitungsweg des Mikrowellensignals
T = Lufttemperatur
T_B = Helligkeitstemperatur
T_C = Kosmische Hintergrundstrahlung ($\approx$ 2,8 K)

Die Absorptionskoeffizienten α der Atmosphäre sind in erster Linie vom Wasserdampf, dem Sauerstoff und den Wassertropfen (Flüssigwasser in den Wolken) abhängig. Der Wasserdampf hat eine Spektrallinie bei 22.235 GHz. Um nur den Wasserdampfanteil des Path Delays zu bestimmen, wird auf zwei unterschiedlichen Spektrallinien gemessen. Durch eine Linearkombination dieser zwei möglichst optimal gewählten Messungen, kann der Flüssigwasseranteil eliminiert werden [Wu, 1979]. Für das WVR des IGP wird das Frequenzpaar 23.8 / 31.5 GHz verwendet.

$$e^{-\tau(\infty)} \cong 1 - \tau(\infty) \quad \text{und}$$
$$\alpha^{-\tau(s)} \cong \alpha$$

Für kleine Opazitäten ist die Gleichung (1) linear [Wu, 1978]. Mit den Vereinfachungen kann man die linearisierte Helligkeitstemperatur T'_B vereinfacht schreiben:

$$T'_B = T_C \cdot [1 - \tau(\infty)] + \int_0^\infty T \cdot \alpha\, ds$$

$$T'_B = T_C + \int_0^\infty (T - T_C) \cdot \alpha \cdot ds \qquad (2)$$

Eine Lösung der Gleichungen (1) und (2) ist [Wu et al., 1978]:

$$T'_B = T_C - (T_{eff} - T_C) \cdot \ln\left(1 - \frac{T_B - T_C}{T_{eff} - T_C}\right) \qquad (3)$$

Für trockene Klimata kann T_{eff} mit $k_e \cdot T$ angenähert werden. Typische Werte für k_e liegen im Bereich $0{,}92 < k_e < 0{,}95$. Sie können mit Radiosondenaufstiegswerten berechnet werden [Claflin et al, 1978]. Für die Temperatur T ist das Tagesmaximum einzusetzen.

Die Berechnung des Path Delays kann nun in ein System mit zwei linearisierten Gleichungen mit zwei Unbekannten überführt werden. Die zwei Unbekannten sind: Der Path Delay und der integrierte Flüssigwasseranteil. Damit erhalten wir für den Feuchanteil ΔL des Path Delays:

$$\Delta L\,(\text{Elev.}) = a_0 m + a_1 T'_{B,1} + a_2 T'_{B,2} \qquad (4)$$

m = Luftmasse = $\frac{1}{\sin(\text{Elevation})}$
$T'_{B,1}$ = linearisierte Helligkeitstemperatur bei 23.8 GHz (Wasserdampf)
$T'_{B,2}$ = linearisierte Helligkeitstemperatur bei 31.5 GHz (Flüssigwasseranteil)

Die sog. Inversionskoeffizienten a_0, a_1, a_2 sind vom regionalen Klima abhängig. Sie werden aus Radiosondierungen berechnet. Für die Radiometer des IGP wurden Datensätze von 1989, 1990 und 1991 verwendet, die uns freundlicherweise von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) in Payerne zur Verfügung gestellt wurden. Die Analyse ergab folgende Werte:

a_0 = –0.696 cm,
a_1 = 0.530 cm/K,
a_2 = –0.302 cm/K

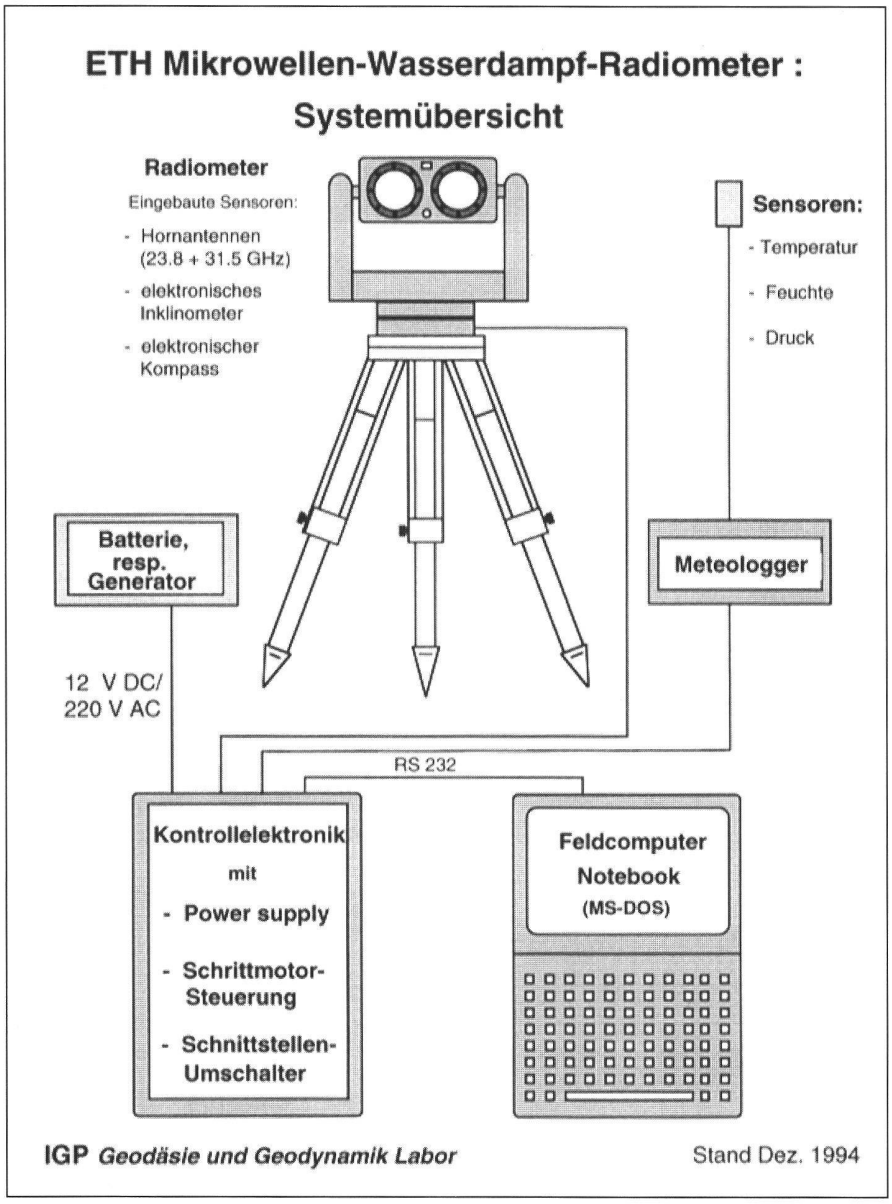

Abb. 2: Die Komponenten des Radiometer-Messsystems des GGL-IGP.

Vergleiche der Radiosondendaten von Payerne mit entsprechenden Sondierungen von Nîmes (F) ergaben praktisch keine Änderungen in den beobachteten Path Delays.

3. Hardwarebeschreibung

3.1 Hardwarekonzept

Als integrierender Bestandteil des Hardwarekonzepts wurde bei der Firma CAPTEC, Consulting, Applied Physics and Software Engineering in Bern, eine Projektstudie[2] in Auftrag gegeben, die die technische Realisierbarkeit zum Inhalt hatte. Dieses Untersuchung zeigte, dass es möglich ist, ein für geodätische Einsätze geeignetes Gerät zu entwickeln, das nicht nur die geforderte Messgenauigkeit aufweist, sondern auch tragbar ist und im Gelände eingesetzt werden kann. Zudem bildete die Einhaltung eines möglichst geringen Stromverbrauchs eine wichtige Zielsetzung, damit auf entlegenen Stationen ein Betrieb mit Autobatterien möglich ist. Da auf Seiten von CAPTEC noch keine Erfahrung im Bau computergesteuerter Nachführungen bestand und anderseits dieser Problemkreis im Rahmen verschiedener Seminar- und Studienarbeiten im GGL des IGP bereits bearbeitet worden war[3], erschien folgende Aufteilung als sinnvoll:

1. Die Firma CAPTEC wurde mit dem Bau der Mikrowellen-Radiometer-Messteile sowie den automatischen Meteo-Datenloggern beauftragt.
2. Das IGP besorgte den Entwurf und die Konstruktion der Montierung, die computergesteuerte motorische Nachführung mit dazugehörender Elektronik für die Stromversorgung, die Ansteuerung der Schrittmotoren sowie für den Zusammenschluss aller übriger Komponenten und Sensoren mit dem PC als Steuerrechner.

Das Radiometer lässt sich für den Transport in zwei Teile zerlegen. Es wiegt insgesamt nur 28 kg und kann, auf einem normalen Vermessungsstativ montiert, mit Netzstrom, einem kleinen Stromgenerator oder einer Autobatterie betrieben werden. Das Gerät kann mittels den in der Montierung integrierten Schrittmotoren und der entsprechenden Steuerelektronik in zwei Achsen bewegt und, computergesteuert, in jede Richtung orientiert und nachgeführt werden. Zur zuverlässigen Kontrolle der räumlichen Ausrichtung des Instruments, die zum Beispiel durch starken Winddruck verändert werden kannn, sind im Mikrowellenteil ein Flüssigkeits-Inklinometer (zur Messung der Elevation) und in der Montierung ein elektronischer Fluxgate-Kompass zur Erfassung der azimutalen Ausrichtung integriert.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Übersicht mit allen Systemkomponenten. Für die Erhebung meteorologischer Stationswerte wird ein Meteo-Datenlogger verwendet. Er kann auch für andere Zwecke eingesetzt werden, da er über einen eingebauten Mikrocomputer verfügt, der bis zu 2000 Messwerte speichern kann.

Durch die computergerecht ausgelegte Ansteuerung sämtlicher Systemkomponenten kann das Radiometer automatisch arbeiten. Das komplette System findet bis auf den Steuerrechner und die Meteo-Ausrüstung vollständig in einer Transportkiste Platz. Damit können bei gut zugänglichen Stationen sowohl die GPS- wie auch die Radiometermessungen von einer zweiköpfigen Beobachterequipe ohne Probleme durchgeführt werden.

3.2 Mikrowellen-Messteil

3.2.1 Messprinzip und interne Kalibration

Der Mikrowellenmessteil hat die Aufgabe, die Strahlungsintensität, resp. die Helligkeitstemperatur der von der Atmosphäre emittierten Strahlung zu messen. Dazu wird das Radiometer mit zwei passiv arbeitenden Hornantennen ausgerüstet. Das empfangene Rauschsignal wird im Mischer vom hochfrequenten Bereich auf eine Zwischenfrequenz von 110 MHz heruntergemischt, um ca. 80 dB verstärkt und auf eine Diode geführt, die das anstehende Signal detektiert und als analoge Spannung anlegt, die der einfallenden Rauschtemperatur proportional ist. Die Strahlungstemperatur selbst wird aus Vergleichsmessungen mit einer «kalten» und einer «heissen» Kalibrationslast bestimmt. Als Heisslast-Quelle dient eine Referenz-Rauschdiode, an die eine Spannung von 28 Volt angelegt wird. Sie erzeugt eine Rauschtemperatur von mehreren tausend Kelvin (K). Nach einer

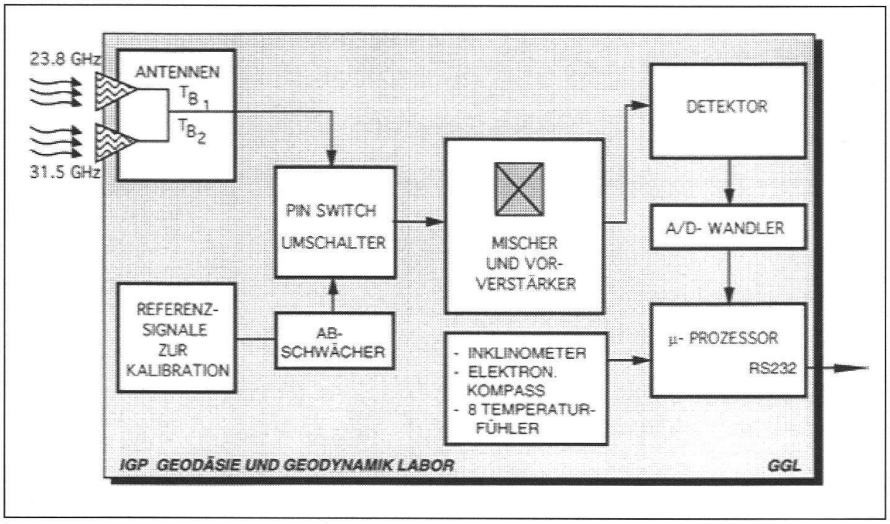

Abb. 3: Zum Funktionsprinzip der Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometer.

Abschwächung in den Bereich von 700 K bis 1000 K kann diese Quelle durch einen speziellen Mikrowellen-Umschalter (pin switch) anstelle des Antennensignals in den Empfangskanal eingelenkt und als «heisse» Referenzlast gemessen werden. Die Kaltlastmessung erfolgt zur selben Diode, jedoch ohne Spannungszuführung. Dies ergibt eine Kaltlasttemperatur, die der Strahlung eines Schwarzkörpers bei aktueller Umgebungstemperatur entspricht. durch diese interne Kalibration wird ein Wegdriften der Messwere verhindert. Abbildung 3 verdeutlicht die prinzipielle Funktionsweise des Radiometers.

3.2.2 Mechanischer Aufbau des Mikrowellenteils

Der eigentliche Messteil ist auf einer 3 mm dicken Aluminium-Grundplatte so aufgebaut, dass sämtliche Mikrowellen-Bauteile und alle elektronischen Schaltkreise übersichtlich und servicefreundlich erreichbar sind. Auf den beiden Längsseiten ist die Grundplatte von zwei Profilschienen abgeschlossen, die einerseits Führungnuten für die Aufnahme von zwei thermisch isolierten Gehäuse-Halbschalen aufweisen und anderseits mit den mechanischen Achszapfen für die Einhängung in die Montierung versehen sind. Abbildung 4 zeigt die (für die Aufnahme vertikal ausgerichtete) Grundplatte mit den darauf montierten Mikrowellenteilen.

Die beiden am unteren Bildrand sichtbaren kegelförmigen Hornantennen sind auf ein in rechtwinkliger Anordnung zur Grundplatte montiertes Frontblech geschraubt. Sie sind mechanisch nur indirekt über die Hohlleiter mit der Grundplatte verbunden. Zur Kontrolle des thermischen Verhaltens sind an den temperaturkritischen Bauteilen Sensoren zur Messung der Temperatur angebracht.

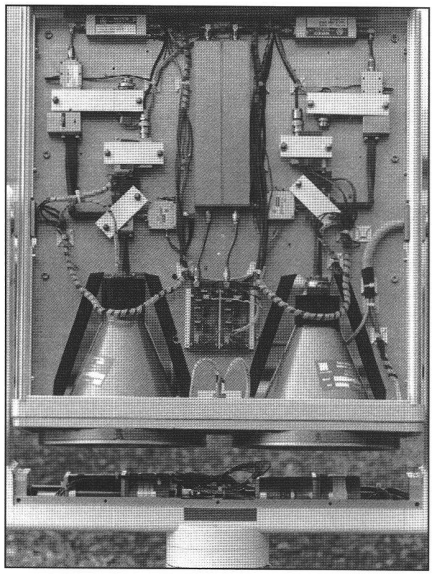

Abb. 4: Aufbau der Mikrowellen-Bauteile auf der Grundplatte des Radiometers. Unterhalb der senkrecht gestellten Hornantennen sieht man die geöffnete Montierung und die eingebauten Schrittmotoren für den Antrieb des Radiometers in Azimut und Elevation.

3.2.3 Mikrowellen-Elektronik

Die für den Betrieb des Mikrowellenteils benötigte Elektronik ist auf der Rückseite der Grundplatte in folgenden fünf Baugruppen (Modulen) aufgebaut (Abbildung 5):

- Stromversorgung mit Filter- und Glättungsstufen. Versorgung 12 bis 15 Volt DC, ungeregelt.
- Mikroprozessor-Modul zur Steuerung der einzelnen Komponente.
- DC/DC Wandler von 12 V auf +5 V, –12 V und +28 V.
- Versorgung, Erfassung und Signalumformung der eingebauten Temperatur-Messfühler.
- Präzisions-DC/DC Wandler zur Versorgung der Gunn-Oszillatoren.

Zusätzlich zur motorgetriebenen Montierung kann das Radiometer auch unabhängig, mit oder ohne direkte Verbindung zu einem PC in Betrieb genommen werden. Dazu dient ein kleines, als RCU (Remote Control Unit) bezeichnetes Steuergerät, das über ein Kabel mit dem Radiometer verbunden wird und über einen Anschluss für die serielleSchnittstelle zum PC verfügt. Diese Betriebsmöglichkeit ist vor allem für Kontroll- und Kalibrationsmessungen, zur Fehlersuche, sowie für Langzeit-Laborversuche vorgesehen, bei denen keine Nachführung benötigt wird.

3.3 Montierung

Da das Radiometer wie ein Theodolit in Azimut- und Elevation nachzuführen ist, eignet sich am besten eine Gabelmontierung. Die azimutale Montierung bietet durch ihre konstruktive Symmetrie keine Probleme, da nur kleine Gegengewichte erforderlich sind. Als Antriebsart wurden kräftig dimensionierte Schrittmotoren gewählt, da es galt, den am Instrument angreifenden Windkräften Rechnung zu tragen. Die im Laufe der praktischen Feldeinsätze gewonnen Erfahrungen mit dem Schrittmotorantrieb haben gezeigt, dass diese Antriebsart bei ungestörten Wetterverhältnissen sehr gut geeignet ist. Die erwähnten Windkräfte können aber die Orientierung des Instruments verändern, was von der Elektronik nicht erkannt wird, da bei Schrittmotoren in der Regel eine Rückkopplung fehlt. Es wurden daher geeignete Sensoren zur Kontrolle der Orientierung eingebaut.

Die Elevation wird mit einem Flüssigkeits-Inklinometer gemessen. Dies ermöglicht eine stetige Kontrolle und allfällige Korrektur der Motorsteuerung. Zudem kann man damit einer eventuellen Ungenauigkeit der Schrittmotor-Positionierung entgegenwirken. Für die azimutale Ausrichtung wurden elektronische Kompasse (inklusive der dazugehörenden Auswerteelektronik) in die Stützen der Montierung

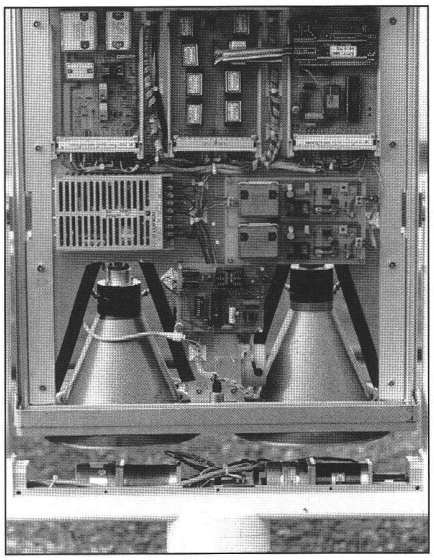

Abb. 5: Anorndung der Elektronik-Baugruppen im Radiometer.

integriert. Sie sind direkt vom PC aus über die serielle Schnittstelle ansteuerbar. Sie liefern das Azimut der Montierung mit einer Genauigkeit von ca. 0,5 Grad, was für die Radiometeranwendung durchaus angemessen ist. Diese neuartigen Sensoren sind klein (4 x 4 x 2,5 cm) und bestehen aus einem Lexan-Gehäuse, in dem ein magnetischer Ringkern (toroidal fluxgate sensing element) in einer elektrisch neutralen Flüssigkeit schwimmt. Dieser Ring wird mit Primärwicklungen, die das Gehäuse umgeben, elektrisch induktiv gesättigt und in Richtung des Erdmagnetfeldes ausgerichtet. Die geographische Ausrichtung bezüglich einer Referenzrichtung wird durch die Sekundärwicklungen gemessen, ausgewertet, digitalisiert und zur seriellen Schnittstelle geleitet. Zur Berücksichtigung lokaler magnetischer Anomalien und Störungen eicht man den Kompass via PC, wobei die entsprechenden Daten automatisch erfasst und in einem nichtflüchtigen EEPROM abgelegt werden. Die Hardware ermöglicht im weiteren die direkte Programmierung der Integrations- und Dämpfungszeit sowie weiterer Parameter mittels PC. Ein wichtiger Vorteil dieser «absolut» arbeitenden Sensoren besteht in der Möglichkeit, die räumliche Ausrichtung des Radiometers nach einem Ausfall oder Unterbruch der Versorgungsspannung während eines automatischen Neustarts abzufragen und die Messreihe ohne manuelle Neuorientierung fortzusetzen.

Abb. 6: Das GGL-IGP Wasserdampf-Radiometer in messbereiter Aufstellung während einer Messkampagne bei der Satellitenbeobachtungsstation des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG) in Wettzell (Bayerischer Wald). Im Hintergrund ist das für VLBI eingesetzte Radioteleskop sichtbar. Die Steuerung des Radiometer-Messsystems wird durch einen MS-DOS Notebook PC durchgeführt, der in der Transportkiste neben dem Gerät untergebracht ist.

Eine wesentliche Randbedingung für den mechanischen Entwurf der Montierung war der Betrieb auf einem normalen Vermessungsstativ. Das Gewicht des ganzen Gerätes (der Mikrowellenteil wiegt rund 15 kg) sollte 30 kg nicht überschreiten, was letzlich mit einem Gesamtgewicht von 28 kg eingehalten werden konnte. Der Entwurf der Montierung erfolgte durch den Konstrukteur des IGP, Ing. HTL H.P. Oesch, der dazu erstmals vom neuen CAD-System des Instituts Gebrauch machen konnte. Aufgrund der mit diesem System erstellten Werkzeichnungen konnten sämtliche Werkstücke am Institut für Werkzeugmaschinenbau und in den Zentralwerkstätten der ETH-KIL-Betriebe kostengünstig angefertigt werden. Das komplette Radiometer-Messsystem des GGL-IGP in messbereiter Aufstellung ist in Abbildung 6 abgebildet.

4. Mess- und Auswerteverfahren

4.1 Messen der Helligkeitstemperaturen

Mit dem Radiometer werden pro Kanal drei verschiedene Quellen angemessen, zum Detektor geleitet, als analoge Spannungen gemessen und zum Mikroprozessor übermittelt (vgl. auch Kap. 3.2.1). Neben dem Signal des Himmels (sky brightness temperature) werden zwei Referenzsignale erzeugt und gemessen. Zwischen den zwei Referenztemperaturen, der Helligkeitstemperatur der Atmosphäre und den gemessenen Spannungen im Wasserdampfradiometer besteht der folgende Zusammenhang:

$$T_B = T_A + (T_H - T_A) \cdot \gamma$$

$$\frac{V_{sky} - V_A}{V_H - V_A} = \gamma \qquad (5)$$

T_B = gemessene Helligkeitstemperatur [K] des Himmels (sky brightness temperature)

T_A = Kaltlasttemperatur [K], gemessen an Rauschdiode ohne Spannung

T_H = Heisslasttemperatur [K], gemessen an Rauschdiode mit Spannung

V_A = gemessene Kaltlastspannung [Volt]

V_H = gemessene Heisslastspannung [Volt]

V_{sky} = gemessene Antennenspannung [Volt] des Sky-Signals T_B

γ = Verstärkung (gain des Systems)

Gleichung (5) gilt nur, falls keine Verluste und Reflexionen im Horn, Hohlleiter und dem Schaltungssystem entstehen. In der Praxis sind diese Verluste aber nicht ganz eliminierbar. Deshalb muss eine Korrektur an der Heisslast angebracht werden [Claflin et al., 1978]. Diese Heisslastkorrektur ΔT_H lässt sich mit der im folgenden beschriebenen «Tipping-Kurven-Technik» bestimmen.

4.2 Kalibration der Messungen mittels «Tipping-Kurven»

Die Methode der Tip-Kurvenanalyse geht von der Überlegung aus, dass die gemessene Helligkeitstemperatur gemäss Gl. (5) als lineare Funktion der mit dem Messstrahl durchdrungenen Luftmassen dargestellt werden kann [Wu, 1978, Elgered, 1993]. Im Zenit (Elevation 90 Grad) wird durch die Luftmasse m = 1, in 30 Grad Elevation durch die Luftmasse m = 2, etc. gemessen. Zwischen der gemessenen Helligkeitstemperatur und der Luftmasse besteht ein linearer Zusammenhang [Wu et al., 1978]. Demzufolge müsste bei einer hypothetischen Messung ohne atmosphärische Luftschichten (m = 0) ein Wert gemessen werden, der dem kosmischen Hintergrundrauschen von ca. 2.8 K entspricht. Deshalb kann man eine Regressionsgerade berechnen, diese Gerade bis zur Luftmasse m = 0 extrapolieren und so den Achsenabschnitt T_B (0) erhalten. Der Achsenabschnitt wird auf den «Sollwert» von 2.8 K gezwängt. In der Folge sind die Messungen iterativ zu korrigieren, bis die Regression für T_B (0) den Sollwert T_C von 2.8 K ergibt. Die sich ergebende Korrektur wird als Heisslastkorrektur ΔT_H bezeichnet (Abb. 7).

Deren Bestimmung erfolgt durch Messung in acht unterschiedlichen Elevationen pro Tipkurve:

(siehe Seite 237 oben).

Die Tip-Kurven werden in den Azimuten 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° und 315° gemessen. Die «troposphärische Halb-Sphäre» kann damit innerhalb von ca. 12 Minuten gescannt und erfasst weden.

Mit den gemessenen Helligkeitstemperaturen der beiden Kanäle kann man anschliessend den Path Delay in Zenitrichtung (äquivalenter Zenit-Path Delay) unter Zuhilfenahme der Formeln (3) und (4) berechnen.

4.3 Verwaltung und Auswertung der Daten in einer Datenbank

Für die Erfassung und Abspeicherung der umfangreichen Messdaten wird das relationale Datenbanksystem ACCESS 2.0 von Microsoft unter Windows verwendet. Die Programmierung der gesamten Aus-

28°,	30°,	35°,	40°,	45°	50°,	60° und	90°, was den Luftmassen
2.13,	2.0,	1.74,	1.55,	1.41,	1.31,	1.15 und	1.0 entspricht

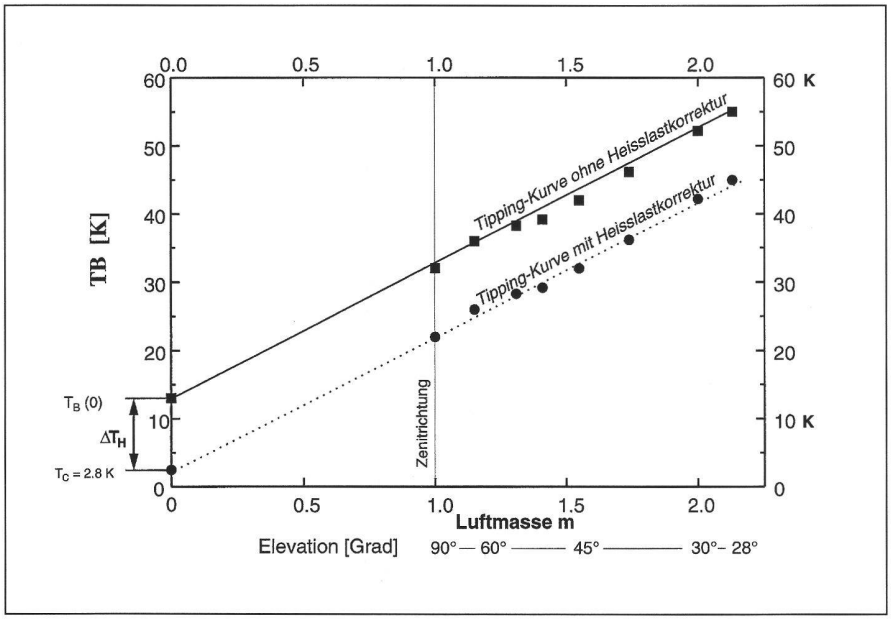

Abb. 7: Tipping-Kurve vor und nach Einbezug der Heisslastkorrektur ΔT_H.

wertung inklusive Tipkurvenanalyse und Filterung der Radiometerdaten wurde innerhalb ACCESS vorgenommen. Die gemessenen Daten werden im Feld laufend in einer ASCII-Datei abgespeichert und anschliessend in die Datenbank eingelesen. In der Datenbank werden alle Datensätze abgelegt, logisch verknüpft und verwaltet. Für die Datenausgabe wurden Module geschrieben, die die Ausgabe entweder in ASCII (z.B. für die graphische Darstellung), oder in einem zum direkten Import in die Berner GPS Software geeigneten Format ermöglichen.

5. Anwendungen

5.1 ESA-Projekt ERS-1

1992 verwendeten wir die Radiometer erstmals in einer typischen Applikation: An Bord des ersten Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 (European Remote Sensing Satellite 1) befindet sich auch ein Mikrowellen-Radar-Altimeter. Das normalerweise über Meeresgebiet eingesetzte Gerät misst laufend die Distanz zur Meeresoberfläche. Wenn die Satellitenbahn genügend genau bekannt ist, lässt sich daraus die momentane Meereshöhe bestimmen. Für die Kalibration dieses Altimeters wurde am Rutherford Appleton Laboratory in Didcot, England, ein Transponder entwickelt, der die vom Satelliten-Altimeter abgestrahlten Impulse empfängt, verstärkt und wieder zum Altimeter zurücksendet. Die Messungen waren sehr erfolgreich, indem die Transpondermessungen die Radarpulse und damit die Distanzmessungen mit einer Präzision von wenigen Millimetern auflösen konnten. Das Problem bestand allerdings in der Kenntnis der genauen Refraktionskorrektur während des Überfluges. Hierzu kamen die Radiometer in Ginzling bei Mayrhofen (Zillertal), auf einer Forschungsplattform in der Lagune vor Venedig sowie in Zimbabwe während längerer Zeit zum Einsatz. Dadurch konnten die Transpondermessungen um die troposphärische Refraktion korrigiert werden [Denys et al. 1993].

Ein neues Produkt im Zusammenhang mit dem Satelliten ERS-1 wurde im Juli 1994 zwischen zwei Transponder-Stationen durchgeführt, wobei ein neuer Transponder-Typ und wiederum die Radiometer verwendet wurden. Die eine Station befand sich auf einer Erdöl-Bohrplattform in der Nordsee, die andere bei Bauma im Zürcher Oberland. Obwohl im Juli vor und nach dem Überflug während drei Tagen sehr schönes und konstantes Sommerwetter mit tiefblauem Himmel herrschte, zeigten die Auswertungen einen stark variierenden Verlauf des Path Delays (Abb. 8). In Abbildung 9 ist die Messanlage mit dem Transponder und den beiden Radiometern sichtbar.

5.2 EU-Projekt SELF (Sea Level Fluctuations: Geophysical Interpretation and Environmental Impact)

5.2.1 Kampagnen und Resultate

Eine wichtige Zielsetzung dieses Projektes besteht in der Bestimmung genauer Punkthöhen von ausgewählten Pegelstationen im Mittelmeerraum in einem einheitlichen globalen Koordinatensystem, das durch SLR[4] oder VLBI[1]-Stationen gegeben ist. Die sich in Gibraltar, Spanien, Frankreich, Italien und Griechenland

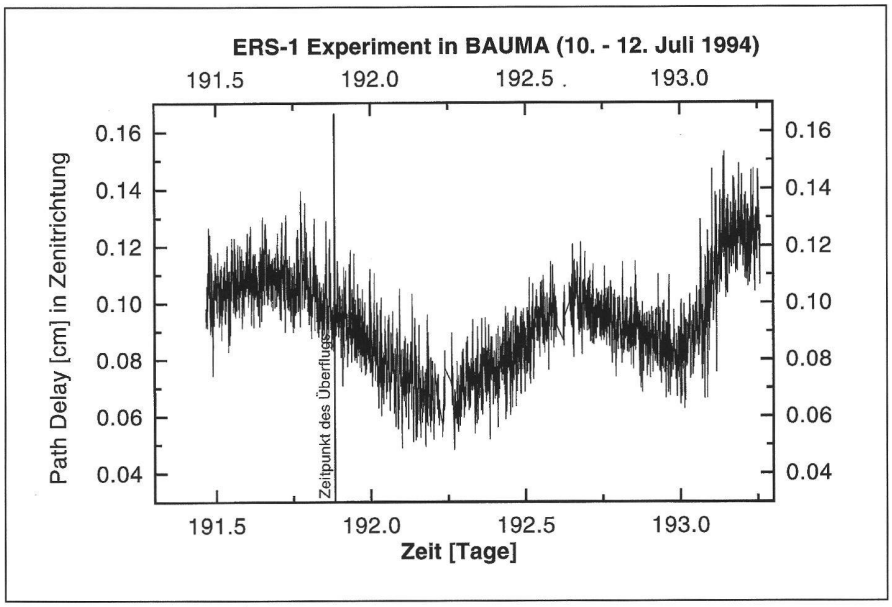

Abb. 8: Gemessener Verlauf des Path Delays vor und nach dem Überflug des ERS-1 Satelliten in Bauma am 10. Juli 1994. Die Messreihe besteht aus über 5700 Einzelmessungen. Der Streubereich der Signale entsteht dadurch, dass die in unterschiedlichen Elevationen und Azimuten durchgeführten Einzelmessungen in den Zenit umgerechnet, und damit Inhomogenitäten über den ganzen Horizont gleich behandelt werden.

Abb. 9: Die beiden IGP-Radiometer und der Radar-Transponder (im Vordergrund) der Universität Graz (A) in Bauma (Zürcher Oberland) im Einsatz für ein ERS-1 Experiment.

befindlichen Pegelstationen wurden alle durch Höhenübertragung mittels GPS an das globale Koordinatensystem angeschlossen. Die Messungen dienen als Grundlage zur quantitativen Erforschung von Meeresspiegeländerungn im Mittelmeer.

Zur Erreichung bestmöglicher Genauigkeit bei der GPS-Höhenübertragung wurde auf allen Stationen eine Messdauer von 48 Stunden festgelegt. Parallel zu GPS wurden Radiometer-Messungen ausgeführt. In Abbildung 10 sind die Pegelstationen dargestellt, die im März/April 1994 vermessen wurden.

Die Auswertung der GPS-Daten erfolgte mit der Software des Astronomischen Instituts der Universität Bern [Rothacher et al. 1993]. Zur Untersuchung der Wiederholbarkeit wurden die Sessionen von 48 Stunden Dauer in 4 Teilsessionen mit je 12 Stunden Dauer einzeln und in verschiedenen Versionen ausgewertet (s. auch Abb. 11).

a) SAAST:

Klassische Auswertung ohne Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse. Diese Werte sind durch die sog. Standardatmosphäre auf Meereshöhe definiert (Temperatur 18 °C, Normaldruck 1013.25 hPa und relative Feuchte 50 %) und für die Berechnungen mit der Formel von Saastamoinen umgerechnet.

b) EST 5/5:

Die Berechnung des Trocken-Delays erfolgte aufgrund der aktuellen Meteo-Messungen. Zusätzlich wurde pro Stunde ein Troposphärenparameter als Unbekannte mit einer a priori-Standardabweichung (absolut und relativ) von 5 cm in die Ausgleichung eingeführt.

c) WVR:

Für die troposphärischen Korrekturen wurden nur die von den Radiometern gemessenen Daten berücksichtigt. Für den Trockenanteil wurde der gemessene Luftdruck eingesetzt.

d) WVR/EST:

Wie c), zusätzlich wurde pro Station ein Troposphärenparameter für die ganze Session (12 h) geschätzt. Die Variante wurde gewählt, um einen eventuellen Offset zwischen den beiden Radiometern zu berücksichtigen.

e) WVR/ST_DR:

Wie c), jedoch anstelle des gemessenen Luftdrucks mit den aus Saastamoinen berechneten Standardwerten. Diese Variante verdeutlicht den Einfluss der vernachlässigten Luftdruckmessung auf die Höhenbestimmung; Pro Millibar Fehler am differentiellen Luftdruckunterschied zwischen den Stationen entsteht ein Fehler von 6 mm am gemessenen Höhenunterschied.

In Abbildung 11 sind exemplarisch die Ergebnisse der verschiedenen Auswertungen der Basislinie von der Satellitenbeobachtungsstation Dionysos (in der Nähe von Athen gelegen) zur Pegelstation in Piräus dargestellt.

5.2.2 Beurteilung der Resultate

Der Vergleich aller Lösungen gemäss Abbildung 11 lässt sich folgendermassen resümieren:

1. Die Auswertung unter Zuhilfennahme der Standardatmosphäre (SAAST, ohne gemessene Bodenmeteo) kann dazu führen, dass die Höhendifferenz um mehrere Zentimeter verschoben wird. In unserem Beispiel liegt diese

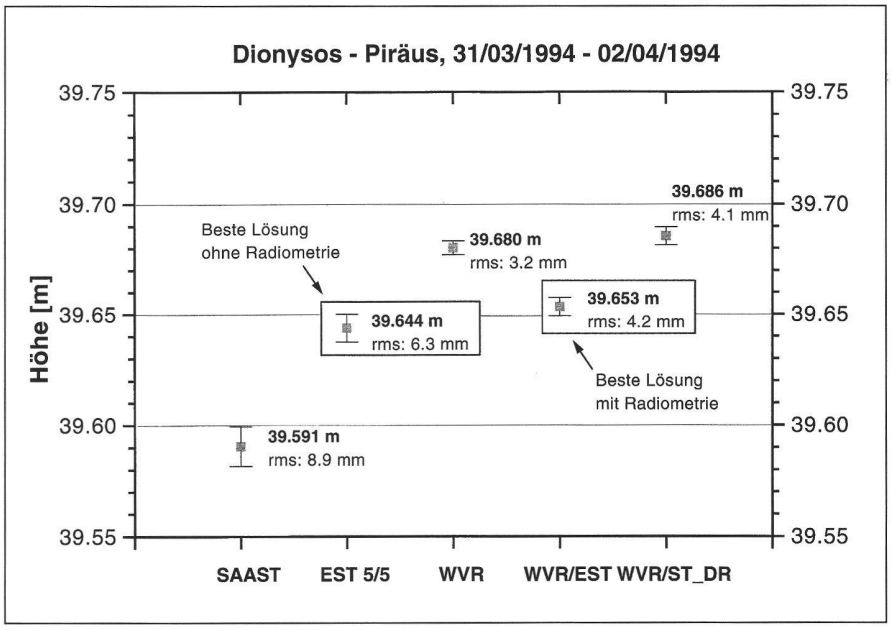

Abb. 11: Basislinie Dionysos–Piräus (Entfernung 31,5 km, Höhendifferenz 470 m): Resultate der verschiedenen GPS-Auswertungen. Die gesamte Messdauer von 48 Stunden wurde in 4 Teilsessionen ausgewertet. Die Vierecke bezeichnen jeweils den Mittelwert aus den 4 Einzelauswertungen, die vertikalen Fehlerbalken repräsentieren die relative Streuung der Einzelergebnisse.

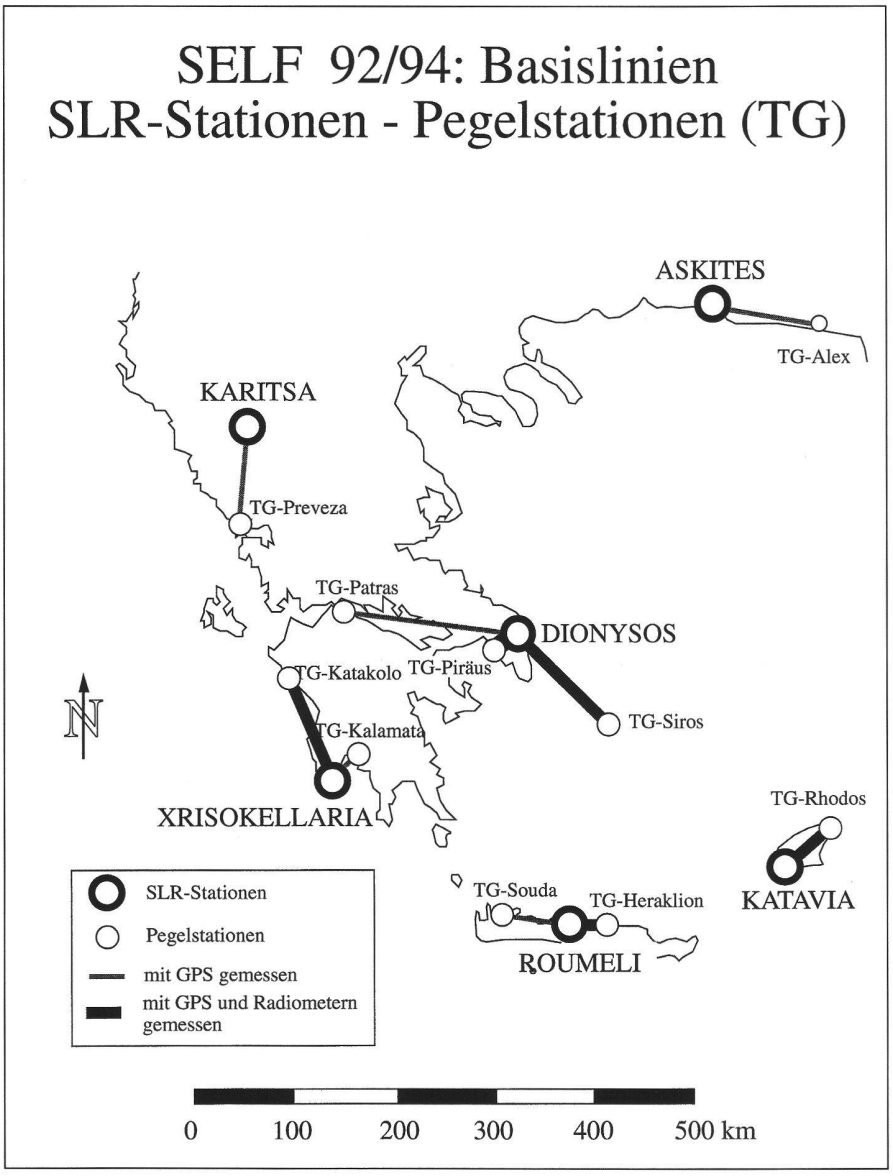

Abb. 10: Pegelstationen in Griechenland, die im Zuge des SELF-Projektes 1992 und 1994 mit GPS und Radiometetrie an ein einheitliches globales Koordinatensystem angeschlossen wurden.

Lösung um fast 6 cm zu tief. Zwischen der kleinsten und grössten Höhendifferenz ergibt sich eine Streuung von 4,8 cm. Die aus den Teillösungen berechnete innere Genauigkeit (Genauigkeit des Gewichtsmittels) liegt bei 8,9 mm.

2. Der Einbezug von gemessenen Boden-Meteodaten (geeichte Messinstrumente!) und die zusätzliche Schätzung von Troposphärenparametern (in unserem Beispiel EST 5/5 wurde pro Stunde eine Unbekannte für den Zenit-Pathdelay mitgeschätzt) verschiebt die Höhendifferenz um 5,3 cm. Diese Lösung bringt eine Verbesserung der inneren Genauigkeit von 8,9 auf 6,3 mm. Die Streuung beträgt 32 mm.
3. Die Auswertung mit radiometrischen Messungen (WVR) bewirkt eine weitere Verschiebung der Höhendifferenz um 3,6 cm. Die Streuung bleibt aber innerhalb von 9 mm, was eine signifikante Genauigkeitsverbesserung von 6,3 auf 3,2 mm ergibt.
4. Wenn neben den Radiometermessungen pro Station ein zusätzlicher Troposphärenparameter mitgeschätzt wird, können eventuelle Offsets zwischen den Radiometern berücksichtigt werden. Diese Lösung liegt um 9,5 mm höher als die Lösung EST 5/5. Sie kann als die wahrscheinlichste erachtet werden. Die Streuung bleibt innerhalb 18 mm. Daraus resultiert eine innere Genauigkeit von 4,2 mm, was gegenüber der besten «Schätzlösung» ohne Radiometrie einer Verbesserung von 30 % entspricht.
5. In der Lösung WVR/ST_DR wurden der radiometrisch gemessene Feuchtanteil und der mit Saastamoinen (Standardatmosphäre) berechnete Trockenanteil kombiniert ausgewertet. Das Resultat verdeutlicht die Notwendigkeit der aktuellen Druckmessung im Gelände.

6. Zusammenfassung, Ausblick

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Genauigkeit von GPS-bestimmten Höhenunterschieden u.a. von folgenden Faktoren abhängig ist (in Klammern stehen die Angaben zur exemplarisch untersuchten Basislinie Dionysos-Piräus):

1. Messdauer (4 x 12 Std.)
2. Höhenunterschied (479 m)
3. Länge der Basislinie (31,5 km)
4. Wetterverhältnisse (wechselhaft)
5. Meteo-Instrumentierung (geeichte Barometer)

Die Genauigkeit von GPS-Höhen sind gegenüber der Lage wesentlich kritischer. Der Einbezug von radiometrischen Daten ist sinnvoll für Netze, in denen grosse Höhendifferenzen und Basislinien über 50 km vorkommen. Im Herbst 1994 wurden gezielt GPS-Testmessungen mit Radiometern im Testnetz Turtmann ausgeführt. Die Auswertungen sollten Auskunft über die absolute Radiometerkalibration geben, da die Höhendifferenzen dort (sog. ground truth) mit hoher Genauigkeit bekannt sind.

Zur Erreichung bestmöglicher Genauigkeiten ist die Messdauer von grosser Bedeutung. Bei Messkampagnen, die möglichst genaue Höhenbestimmungen zum Ziel haben, ist diesem Umstand speziell Rechnung zu tragen. Bei genügender Messdauer und zuverlässig gemessener Stationsmeteorologie bringt die Schätzung von Troposphärenparametern mit der Berner GPS Software gute Resultate.

Die Anwendung der Mikrowellen-Radiometrie beschränkt sich nicht nur auf die GPS-Messtechnik, sondern ist auch bei anderen Mikrowellen-Messverfahren einsetzbar. Zur Zeit ist eine neue Generation von transportablen Radiometern bei CAPTEC und am IGP in Entwicklung, von der man eine weitere Verbesserung der Messgenauigkeit erwarten kann. Im weiteren bildet der Einbezug von Azimutabhängigkeiten des Path Delays einen weiteren Schwerpunkt. Parallel dazu wird im GGL auch die Weiterentwicklung der Troposphären-Modellierung vorangetrieben, mit dem Ziel, die zur Verfügung stehenden Daten der SMA-Stationen operationell in die numerische Modellierung einzubinden und für geodätische GPS-Anwendungen nutzbar zu machen (vgl. Artikel Geiger et al., dieses Heft).

Literatur:

Bürki, B., Cocard, M., Geiger, A., Gyger, R. and H.-G. Kahle (1992): Development of a Portable Dual Frequency Microwave Water Vapor Radiometer for Geodetic Applications. In: De Munck and Spoelstra (Eds.), Refraction of transatmospheric signals in Geodesy. Proceedings of Int. Symposium. Netherlands Geodetic Commission, New Series, no. 36: 129–133.

Claflin, E. S., S. C. Wu and G. M. Resch (1978): Microwave Radiometer Measurement of Water Vapor Path Delay: Data Reduction Techniques. DSN Progress Report 42–48. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, pp 22–30, Sept. / Okt. 1978.

Davis, J.L., Elgered, G., Niell, A. E. and I.I. Shapiro (1992): Horizontal Gradients in the «Wet» Atmospheric Propagation Delay. In: De Munck and Spoelstra (Eds.), Refraction of transatmospheric signals in Geodesy. Proceedings of Int. Symposium. Netherlands Geodetic Commission, New Series, no 36: 25–28.

Denys, P. H., Birks, A., Cross, P. A. and J. Powell (1993): Precise Height Determination using the ERS-1 Radar Altimeter and Active Ground Based Transponders. Final Report Nr. 93/0804 prepared for European Space Agency (ESA), Earth Observation Department, ESA Directorate for Observation of the Earth and its Environment, ESTEC, Noordwijk, NL.

Elgered, G., Davis, J.L., Herring, T.A. and I.I. Shapiro (1991): Geodesy by VLBI: Water Vapor Radiometry for estimation of the wet delay. J. Geophys. Res., 96, B4: 6541–6555.

Elgered, G. (1992): Refraction in the Troposphere. In: De Munck and Spoelstra (Eds.), Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Proceedings of Int. Symposium. Netherlands Geodetic Commission, New Series, no. 36: 13–19.

Johansson, J., Elgered, G. and J. Davis (1993): Wet Path Delay Algorithms for Use with Microwave Radiometer Data. In: Smith and Turcotte (Eds.), Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics. American Geophysical Union (AGU). Geodynamics Series, Vol. 25: 81–98, Washington, D.C.

Kuehn, C., Elgered, G., Johansson, J., Clark, T. and B. Roennaeng (1993): A Microwave Radiometer Comparison and its Implication for the Accuracy of Wet Delays. In: Smith and Turcotte (Eds.), Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics. American Geophysical Union (AGU). Geodynamics Series, Vol, 25: 99–114. Washington, D.C.

Peter, R. and N. Kämpfer (1992): Radiometeric Determination of Water Vapor and Liquid Water and its Validation with Other Techniques. J. Geophys. Res., 97, D16: 18 173–18 183.

Rocken, C., Ware, R., Van Hove, T., Solheim, F., Alber, C., Johnson, J., Bevis, M. and S. Businger (1993): Sensing atmospheric water vapor with GPS. Geophys. Res. Letters, 20, No. 23: 2631–2634.

Rothacher, M. Beutler, G., Gurtner, W. Brockmann, E. und L. Mervart (1993): Documentation on the Bernese GPS Software, Version 3.4 Mai 1993.

Ware, R., Rocken, C., Solheim, F., Van Hove, T., Alber, C. and J. Johnson (1993): Pointed Water Vapor Radiometer Corrections for Accurate GPS Surveying. Geophys. Res. Letters, 20, No. 23: 2635–2638.

Wild, U. (1994): Inosphere and Geodetic Satellite Systems: Permanent GPS Tracking and Monitoring. Schweizerische Geodätische Kommission, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 48.

Wu S. C. (1978): Frequency Selection and Calibration of a Water Vapor Radiometer. DSN Progress Report 42–43. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, pp 76–81, Feb. 15, 1978.

Wu S. C. (1979): Optimum Frequencies of a Passive Microwave Radiometer for Tropospheric Path-Length Correction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, No. 2, March 1979.

Anmerkungen:

[1] VLBI: Very Long Baseline Interferometrie ist ein geodätisches Messverfahren, bei dem mittels Korrelationsrechnung auf zwei Radioteleskop-Stationen die Laufzeitunterschiede der gemessenen Rauschstrahlung von Quasaren benutzt wird, um hochgenaue Entfernungen und Erdrotationsänderungen zu bestimmen [Kuehn et al., 1993].

[2] Gyger, R., Künzi, K. und Kämpfer, N. (1988): Wasserdampf-Mikrowellen-Radiometer zur Bestimmung der atmosphärischen Weglängenkorrektur. Theorie und praktische Realisierung für die Anwendung in der Geodäsie. Bericht zu Handen des IGP der ETH Zürich.

[3] Oswald, A. (1989): Computergesteuerte Nachführung von astronomischen Kleinteleskopen. Seminararbeit am IGP.

[4] SLR (Satellite Laser Ranging) bezeichnet die Distanzmessung mittels Laserteleskopen zu speziellen Satelliten, die mit Retroreflektoren ausgerüstet sind. Mit dieser Methode lassen sich u.a. Koordinaten von Stationen mit hoher Genauigkeit in einem globalen System bestimmen.

Adresse der Verfasser:

Prof. Dr. H.-G. Kahle
Dr. B. Bürki
Geodäsie und Geodynamik Labor
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich