

Verwendung des Globalen Positionierungssystems als **Wasserdampfsensor**

Michael Mayer, Bernhard Heck

Meteorologische Grundlagen

100000	Interplanetarer Raum				
10000	Thermosphäre	Heterosphäre	Protonosphäre	Exosphäre	Magnetosphäre
1000	Mesosphäre		Ionosphäre		
100	Stratosphäre	Homosphäre	Neutrosphäre		
10	Troposphäre				
0					
	Temperatur	Zusammensetzung	Ionisierung	Fluchtbewegung	Magnetfeld

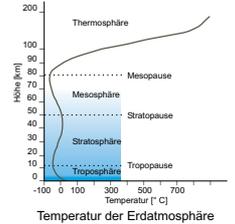
Klassifizierung der Erdatmosphäre (Neutrosphäre: blau)

Auf Grund der Gravitationskraft der Erde werden Luftmoleküle daran gehindert, sich in den Weltraum zu verflüchtigen. Diese Bestandteile bilden eine Hülle um den Erdkörper. Sie besteht aus einem als konstant aussehendem Gemisch verschiedener Gase - hauptsächlich Stickstoff (ca. 78%) und Sauerstoff (ca. 21%), deutlich kleinere Anteile entfallen auf Edelgase (z.B. Argon, Helium, Krypton, Neon, Xenon), Kohlendioxid, Ozon und Wasserstoff.

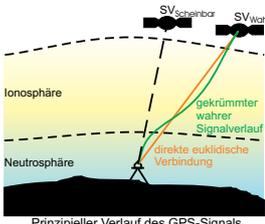
Der wichtige atmosphärische Bestandteil **Wasserdampf** hat einen wesentlichen Einfluss auf **Wetter und Klima** und spielt eine zentrale Rolle in der Chemie der Erdatmosphäre. Wasserdampf ist das dominierende **Treibhausgas** und kommt in **zeitlich und**

räumlich sehr variablen Konzentrationen vor. Erd- und Meeresoberflächen sind Wasserdampfquellen im Klimasystem. Von dort gelangt der Wasserdampf bspw. durch Verdunstung in die Atmosphäre und wird in die dort herrschenden Transportverhältnisse eingegliedert. Trotz seiner großen Bedeutung für atmosphärische Prozesse in einem breiten räumlichen und zeitlichen Skalenbereich ist Wasserdampf bisher eine **schwer zu erfassende Komponente** im Haushalt der Erdatmosphäre geblieben.

Die **Kenntnis von globalen und regionalen Verteilungen von Wasserdampf und seiner zeitlichen Variation ist grundlegend für Wettervorhersage und Klimaforschung**.



GPS-Auswertung



Zweiteilige GPS-Modellbildung

Einfluss der Neutrosphäre auf GPS-Phasenbeobachtungen kann nicht durch Mehrfrequenzbeobachtungen reduziert werden, da elektrisch neutrale Atmosphärenbereiche für elektromagnetische Wellen des L-Bands **nicht dispersiv** sind (Gegensatz zur Ionosphäre). Deshalb erfolgt i.d.R. durch **a priori Prädiktionsmodell** und **Zusatzparameterschätzung** eine **zweiteilige Modellierung** dieser limitierenden Einflüsse.

= **A priori Prädiktionsmodell**: Basierend auf Annahmen hinsichtlich des Verhaltens der Neutrosphäre (z.B. Temperaturgradient) wird eine Approximation der tatsächlich herrschenden Bedingungen bspw. durch Extrapolation von bodennah erfassten Meteorologiewerten erzielt.

subsummiert die Einflüsse der Neutrosphäre.

$$T = T_0 + 0.0065 \cdot h - h_0 \cdot h_0 \cdot 5.25 \times 10^{-6}$$

$$p = p_0 \cdot 1 - 0.0000226 \cdot h - h_0 \cdot 5.25 \times 10^{-6}$$

$$f = f_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.00016017 \cdot h - h_0 \cdot 5.25 \times 10^{-6}}$$

$$n_{\text{wet}} = 0.002277(1 - 0.000266 \cdot \cos^2 \theta) - 0.000284 \cdot p \cdot \frac{1255}{T} - 0.05 \cdot \tan^2 z$$

+ **Zusatzparameterschätzung**: Im Rahmen der relativen Positionsbestimmung (Doppeldifferenzen, Phasenbeobachtung) - nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate durchgeführt - werden mit einer vorgegebenen Stochastik stationsabhängige Verbesserungen des Prädiktionsmodells in zenitaler sowie in horizontaler Richtung mittels geeigneter funktionaler Ansätze mit eingeschränkter zeitlicher Gültigkeit (z.B. 2 h) bestimmt.

Bestimmung des Wasserdampfgehalts mittels GPS

Allgemein lässt sich der Einfluss der Neutrosphäre auf die Strecke zwischen GPS-Satellit (SV) und Empfangsantenne (E) mittels

in Abhängigkeit vom Brechungsindex n bzw. von der Brechzahl N berechnen. Die Brechzahl N wird i.d.R. in Abhängigkeit von **meteorologischen Größen** wie **Temperatur T** , **Partielldruck der trockenen Luft p_d** und **Wasserdampfdruck e** sowie experimentell bestimmten Koeffizienten k_1 unter Verwendung von

$$N = \left(k_1 \frac{p_d}{T} \right) + \left(k_2 \frac{e}{T} \right) + \left(k_3 \frac{e^2}{T^2} \right) = N_{\text{dry}} + N_{\text{wet}}$$

trocken feucht

ausgedrückt und bspw. in einen **trockenen** und einen von e abhängigen, **feuchten** Anteil zerlegt.

Kann im Rahmen der GPS-Auswertung der feuchte Anteil des Einflusses der Neutrosphäre n_{wet} separiert werden, so ist daraus der gesamte integrierte **atmosphärische Wasserdampfgehalt (IWV)** bestimmbar. Im lokalen topozentrischen Zenit jeder GPS-Beobachtungsstation gilt

$$IWV = \int_{\text{NEEL}}^{\infty} n_{\text{wet}} \cdot \rho \cdot dr$$

7 mm des feuchten zenitalen neutrosphärischen Einflusses entsprechen genähert ca. 1 mm **IWV**.

Die Hilfsgröße ist mittels

$$T_m = \frac{10^4}{\frac{e}{R_d} \cdot \frac{k_3}{T_m} + k_2 + k_1 \frac{R_d}{R_d}}$$

in Abhängigkeit von den spezifischen Gaskonstanten der trockenen (R_d) und der feuchten Luft (R_w), der Dichte des Wassers ρ_w sowie von der **mittleren atmosphärischen Temperatur T_m**

$$T_m = \frac{e}{T} \cdot \frac{dh}{dh}$$

berechenbar.

Unter Verwendung der Dichte des Wassers können **IWV**-Werte (engl. **Integrated Water Vapour**) in den sog. ausfüllbaren integrierten atmosphärischen Wasserdampf **IPWV** (engl. **Integrated Precipitable Water Vapour**) umgerechnet werden.

$$IPWV = IWV \cdot \rho_w$$

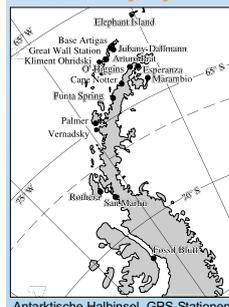
IPWV ist äquivalent zur Menge an flüssigem kondensiertem Wasser und wird i.d.R. in Säulenhöhe [mm] angegeben.

Die **Meteorologie** beschäftigt sich u.A. damit das **Klima der Erde** zu erforschen und **Wettermodelle** zu entwickeln, welche bspw. notwendig sind, um zuverlässige **Wettervorhersagen** tätigen zu können. Grundlagen hierfür sind neben physikalischen Modellen zeitlich und räumlich - sowohl horizontal als auch vertikal - gut aufgelöste meteorologische Beobachtungen.

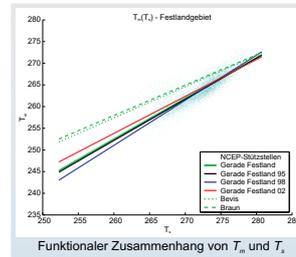
Ausgewählte meteorologische Standard-Sensoren:

- **Oberflächennahe Meteorologiestation** (kostengünstig, horizontal gut aufgelöst, Verfälschungen durch lokales Mikroklima möglich, keine vertikale Auflösung, zeitlich hochauflösend)
- **Radio sonden** (gute vertikale Auflösung, geringe zeitliche Auflösung, kostenintensiv)
- **Wasserdampfradiometer** (sehr kostenintensiv, geringe horizontale Auflösung, bei Regen nicht einsatzfähig)
- **Schiffgestützte Sensoren** (geringe horizontale Auflösung, Informationsbasis auf Ozeanen und Meeren)
- **Satellitengestützte Sensoren** (schlechte Genauigkeit, Informationsbasis im ozeanischen Bereich)

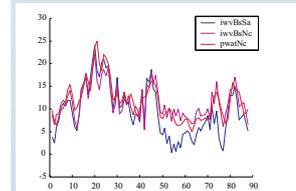
Globale Satellitennavigationsysteme (**GNSS**) wie GPS und GALILEO besitzen ein großes Potential die Defizite der o.g. meteorologischen Standardsensoren zu beheben. Im Speziellen bestehende Permanentstationsnetze (z.B. IGS, EUREF, SAPOS) zeichnen sich durch eine **sehr gute horizontale und zeitliche Auflösung** aus und sind weiterhin **sehr kostengünstig**.



Im **geophysikalisch und meteorologisch hoch interessanten Bereich der Antarktischen Halbinsel** werden **umfangreiche Studien** durchgeführt, um die **erzielbaren Genauigkeiten bei der Ableitung von Schätzwerten für den atmosphärischen Wasserdampfgehalt basierend auf GPS-Beobachtungen abschätzen zu können**. Eine unabhängige **Validierung** ist bspw. durch **Radio-sondierungen** und **Wettermodell**daten möglich.



Zur Vereinfachung wird die mittlere atmosphärische Temperatur T_m i.d.R. unabhängig vom tatsächlichen atmosphärischen Zustand lediglich in **Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_s** berechnet. Hierzu sind verschiedene funktionale Zusammenhänge (z.B. BRAUN oder BEVIS) bekannt, die jedoch für den Bereich der Antarktischen Halbinsel angepasst und leicht modifiziert werden müssen, um beste Ergebnisse zu garantieren, was **Vergleiche zu NCEP-Wettermodell**daten zeigen.



Analysen von verschiedenen GPS-basierten **IWV**-Werten (Neutrosphärenmodelle: Saastamoinen, Niell) mit Vergleichswerten des NCEP-Wettermodells geben Aufschluss über sinnvolle und weniger geeignete Ansätze.

Künftig soll der Weg zur **4D-Atmosphärentomographie** (zeitabhängige räumliche Darstellung der Erdatmosphäre) beschritten werden. Dazu sollen auch **Doppeldifferenzresiduen** verwendet werden, die zu einer **verbesserten azimutalen Auflösung** beitragen können.

Information

Geodätisches Institut
Englerstraße 7
D-76131 Karlsruhe

Information im Internet
www.gik.uni-karlsruhe.de

Kontakt
mmayer@gik.uni-karlsruhe.de
heck@gik.uni-karlsruhe.de

Phone +49- (0) 721 6083668
Fax +49- (0) 721 6086808



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität • gegründet 1825

Geodätisches Institut