

# SPEKTRALANALYSE VON HOCHRATIGEN GPS-PHASENMESSUNGEN UND ABGELEITETEN FEHLERANTEILEN

A. Hirrlinger, E. Engler  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Kommunikation und Navigation  
Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz

## ÜBERSICHT

Am DLR Neustrelitz werden Methoden und Verfahren zur GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Signal- und Datenqualitätsbewertung entwickelt, die für die experimentelle Verifikation von Galileo und für die Bereitstellung lokaler Ergänzungsinformationen und -korrekturen eingesetzt werden. Ein Fokus liegt dabei auf der Bestimmung einzelner Fehleranteile in den Trägerphasenmessungen.

Für die Realisierung dieses Vorhabens ist, basierend auf 50-Hz-Hochratendaten eines GPS-Empfängers in Tromsø/Norwegen und Neustrelitz/Deutschland, das Potenzial der Spektralanalyse untersucht worden. Von Interesse ist dabei unter anderem der Einfluss der zu Grunde liegenden Methode zur Bestimmung des Phasenrauschens, sowie der Einfluss der Spektralanalysekonfiguration (Wahl des Fensters, Intervalllänge) auf die ermittelten Spektren. In den Untersuchungen sind Störsignaturen in den Rauschspektren detektiert worden. Mit Hilfe einer erarbeiteten Separierungsstrategie können erste Ergebnisse hinsichtlich einer Zuordnung der ermittelten Signaturen zu ihren Ursachen (Ionosphäre, Troposphäre, Mehrwegeausbreitung) vorgestellt werden.

## 1 ERMITTLUNG DES PHASENRAUSCHENS

In der nachstehenden Abbildung ist das Prinzip der Rauschbestimmung veranschaulicht.

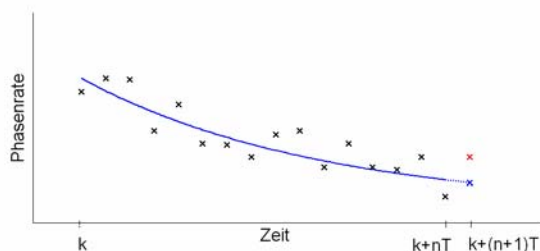


Bild 1: Prinzipskizze der Rauschbestimmung

Eine Anzahl  $n$  aufeinander folgender Signalwerte (Phasenraten) im Abstand der Abtastschrittweite  $T$  wird durch ein Polynom approximiert. Somit werden durch dieses Polynom die niederfrequenten, langsam veränderlichen Anteile des Signals sowie niederfrequente Störungen erfasst. Mit Hilfe des Polynoms wird der folgende Signalwert präzisiert. Die Abweichungen dieser vorhergesagten Werte von den dann tatsächlich gemessenen Signalwerten ergeben unter der Bedingung einer idealen Polynomapproximation in ihrer Gesamtheit eine Abschätzung für das im Signal enthaltene Rauschen, inklusive höherfrequenter Störungen. Bei einer unzureichenden Approximation bildet sich zu dem der Modellierungsfehler im Rauschen ab.

Die für die Rauschbestimmung genutzte Regression kann als Hochpass interpretiert werden, wobei die 3-dB-Grenzfrequenzen des Hochpasses von der Wahl der Polynomordnung (Bild 2), der Polynomlänge (Bild 3) und der Abtastfrequenz (Bild 4) abhängig sind. Für die Untersuchung des Einflusses dieser drei Parameter sind jeweils zwei konstant belassen und der dritte variiert worden.

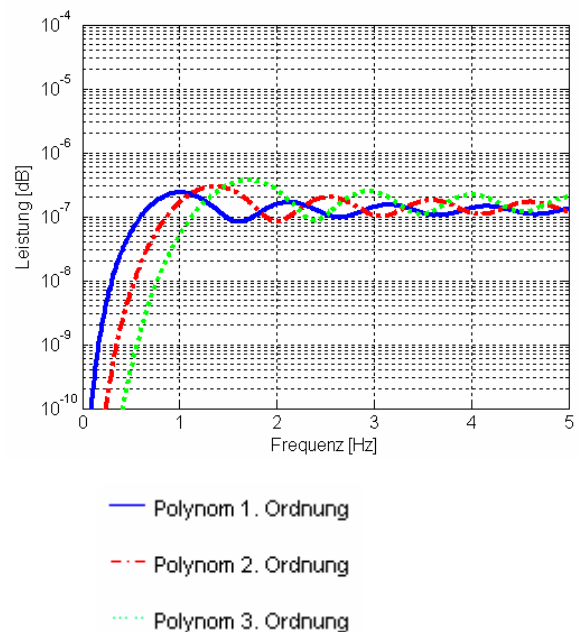
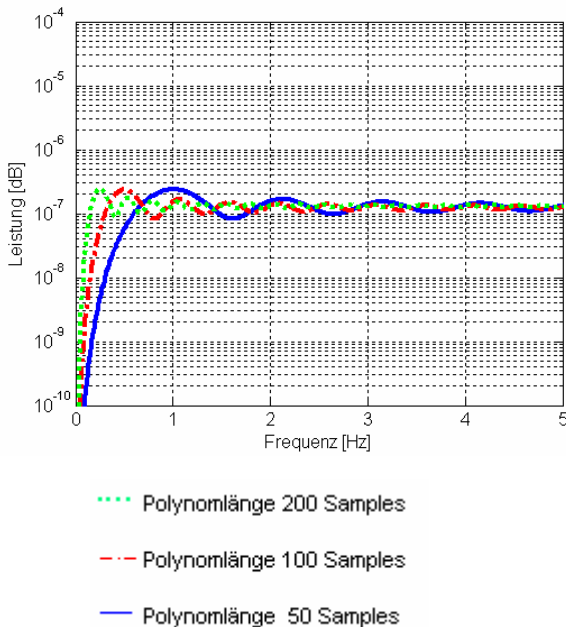


Bild 2: Hochpasscharakteristik der Rauschbestimmung in Abhängigkeit der Polynomordnung

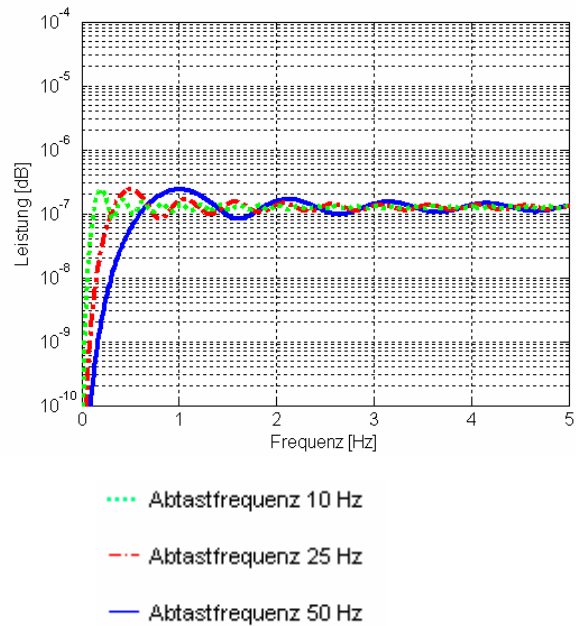
Je höher die Ordnung des Regressionspolynoms, desto höher ist die Grenzfrequenz (Bild 2). Somit müssen Störer immer höherfrequenter werden, um sich im Durchlassbereich und somit im ermittelten Rauschspektrum zu befinden. Dies geht einher mit der Erkenntnis, dass sich ein Polynom höherer Ordnung besser an schnelle, höherfrequente Änderungen des Signals anpassen kann und sich so die Prädiktion verbessert.



**Bild 3: Hochpasscharakteristik der Rauschbestimmung in Abhängigkeit der Polynomlänge**

Mit zunehmender Polynomlänge sinkt die Grenzfrequenz (Bild 3). Somit wird der Sperrbereich schmalbandiger und es befinden sich mit zunehmender Länge immer niederfrequenter Störer bereits im Durchlassbereich, also im Rauschspektrum. Die Ursache liegt darin begründet, dass sich das Polynom mit zunehmender Länge schlechter schnellen, höherfrequenten Änderungen des Signals anpassen kann. Die Prädiktionen werden schlechter.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Erhöhung der Abtastschrittweite, das heißt, bei sinkender Abtastfrequenz. Auch hier sinkt die Grenzfrequenz (Bild 4). Da bei gleicher, geforderter Anzahl an Datensamples ein längerer Zeitraum für die Bildung des Regressionspolynoms betrachtet werden muss, können kurzzeitige, schnelle Änderungen schlechter vorausgesagt werden.



**Bild 4: Hochpasscharakteristik der Rauschbestimmung in Abhängigkeit der Abtastfrequenz**

Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen ist ein Polynom 1. Ordnung, über 50 Samples bei einer Abtastfrequenz von 50 Hz.

## 2 SPEKTRALANALYSE

Die Spektralanalyse wird mittels Diskreter Fourier Transformation (DFT) durchgeführt. Einstellende Parameter sind dabei die Art des Fensters und die Länge des Analyseintervalls (Anzahl an Stützstellen).

Voraussetzung für die Durchführbarkeit der DFT ist die Stationarität der zu analysierenden Signale im Analyseintervall. Um diese zu gewährleisten, wird eine Kurzzeit-Fouriertransformation durchgeführt. Das Signal wird stückweise gefenstert und transformiert. Danach wird das Fenster verschoben und die Prozedur wiederholt. Dies geschieht solange, bis das Signal vollständig analysiert ist. Je nach Verhältnis von Fensterlänge und Verschiebung überlappen sich die zu analysierenden Intervalle. Die Überlappung ist neben den bereits genannten Parametern ein dritter einzustellender Parameter. Er wird für die nachfolgenden Betrachtungen zu 50 % gesetzt.

Ein erster Anhaltspunkt für die Wahl der Stützstellenanzahl ist die erwartete Dauer der Störungen, welche von der Ionosphäre und durch Mehrwegeausbreitung verursacht werden. Diese werden im Minutenbereich erwartet. Die Länge des Analyseintervalls sollte möglichst nicht länger sein, als die Störung, um eine Darstellung der Störung im

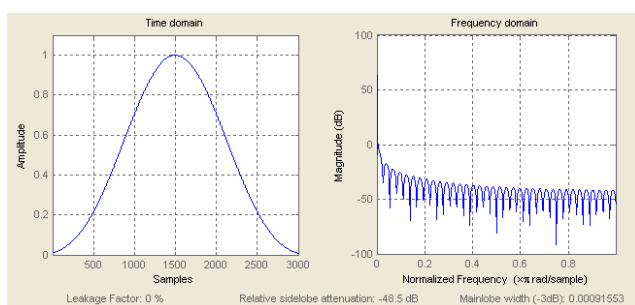
Spektrum nicht dadurch zu unterdrücken. Daher wird als erste Einstellung eine Analyseintervalllänge von 1 Minute gewählt.

Bei der Wahl des Fensters ist zu beachten, dass das Spektrum des eigentlichen Signals durch das Spektrum des Fensters beeinflusst wird. Entscheidend für die Beeinflussung des Signalspektrums durch das Spektrum des Fensters sind die Breite des Hauptmaximums der Fensterübertragungsfunktion und das Verhältnis der Amplituden von Haupt- und erstem Nebenmaximum. Sie bestimmen, inwieweit dicht beieinander liegende Frequenzen aufgelöst werden können und wie stark sich benachbarte Frequenzkomponenten beeinflussen (Leck-Effekt).

Für die meist verwendeten Fenster (u.a. Hamming, Bartlett, Blackman), wird die Breite des Hauptmaximums über die Länge des Fensters bestimmt. Das bereits erwähnte Verhältnis zwischen Haupt- und erstem Nebenmaximum ergibt sich aus der Definition des Fensters und ist für dieses dann fest. Allgemein gilt, dass (bei gleicher Länge  $N$ ) ein Fenster mit schmalerem Hauptmaximum und somit besserer Frequenzauflösung ein schlechteres Amplitudenverhältnis zwischen Haupt- und erstem Nebenmaximum und somit größerem Leck-Effekt besitzt.

Für die durchgeführten Untersuchungen ist als Fenster ein Kaiserfenster gewählt worden. Dieses wird über eine modifizierte Besselfunktion  $J_0$  erster Art, nullter Ordnung gebildet (vgl. [OpSc-97] und [BrSe-05]). Für andere Fenster, die als einzigen Parameter die Länge  $N$  besitzen, wäre nach der Wahl dieser somit das Erscheinungsbild des Fensters und der Einfluss auf die zu analysierenden Daten festgelegt. Der Vorteil des Kaiserfensters besteht darin, dass es zusätzlich den weiteren Parameter  $\beta$  besitzt. Hierüber lässt sich die Form des Fensters bestimmen.

Bei einem Analyseintervall von einer Minute und einer Abtastfrequenz von 50 Hz ergeben sich bei einer Forderung nach maximaler Frequenzauflösung sowie Minimierung des Leck-Effektes die Parameter des Kaiserfensters zu Länge  $N = 3000$ , Formparameter  $\beta = 5.8$  (Bild 5).



**Bild 5: Kaiserfenster mit  $N = 3000$  und  $\beta = 5.8$**

### 3 SEPARIERUNGSSTRATEGIEN FÜR STÖRUNGSURSACHEN

Von der Generierung im Satelliten bis zur Verarbeitung im Empfänger sind die abgestrahlten Trägerphasen äußeren Einflüssen unterworfen, die Störungen auf dem Signal verursachen. Die verschiedenartigen Charakteristika der einzelnen Störungsursachen bewirken einen unterschiedlichen Einfluss auf die Trägerphasen der Satelliten. Somit besteht die Möglichkeit einer Klassifizierung der auftretenden Störungen hinsichtlich ihrer Ursachen.

#### Störungsursachen im Satellit

Störungen im Satelliten können durch die Eigenschaften diverser Bauteile (z.B. thermisches Rauschen) insbesondere der Uhren verursacht werden. Uhrenfehler entstehen unter anderem durch Umgebungseinflüsse (z.B. Druck Temperatur, Beschleunigung) oder Alterung. Treten sie auf, werden die entsprechenden Störungen in den Spektren beider Träger ersichtlich, da die Erzeugung und Modulation beider Trägerfrequenzen auf der gleichen, zeitlichen Grundlage basieren. Länge und Wiederholung dieser Effekte sind abhängig von der Behebung der Ursachen durch den Betreiber. Ob eine satellitenspezifische Störung vorliegt, lässt sich gut nachvollziehen, wenn die Daten mehrerer Stationen vorliegen, von denen der betroffene Satellit getrackt worden ist.

#### Störungsursachen im Ausbreitungsweg

Die Ionosphäre ist für Frequenzen im L-Band ein dispersives Medium. Das bedeutet, dass unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich stark beeinflusst werden. Somit sollten sich Störungen, welche durch die Ionosphäre verursacht werden, im Differenzspektrum der beiden Träger L1 und L2 eines Satelliten abbilden. Sie sollten ebenso zeitgleich in den Spektren aller Satelliten erkennbar sein, deren Signalübertragungsweg durch die Störung führt. Form und Stärke der Signatur können dabei variieren. Bei großräumigen Störungen können mehrere Satelliten betroffen sein, wohingegen bei kleinräumigen Störungen durchaus die Möglichkeit der Beeinflussung nur eines einzelnen besteht. Da die Ionosphäre ein sich ständig änderndes Medium ist, werden sich Störungen in den Spektren weder in der Form noch im Zeitbezug identisch wiederholen.

Die Troposphäre ist für Frequenzen im L-Band kein dispersives Medium. Durch sie hervorgerufene Störungen werden auf beiden Trägern gleich stark ausgeprägt sein. Ähnlich wie bei Störungen, die durch die Ionosphäre verursacht werden, sollten sie zeitgleich in den Spektren aller betroffenen Satelliten sichtbar sein, sofern sich diese im Einflussgebiet der

Störung befinden. Da auch die Troposphäre ein sich ständig änderndes Medium ist, werden sich Störungen nicht systematisch nach einem bestimmten Zeitraum wiederholen.

Störungen auf Grund von Mehrwegeausbreitung treten dann auf, wenn sich im Ausbreitungsweg des Signals Hindernisse befinden, an denen das Signal reflektiert wird und sich dieses indirekte dem auf direktem Weg einfallenden Signal überlagert. Hindernisse können dabei statischer Natur (Berge, Häuser) oder dynamischer Natur (sich bewegende Baumkronen, saisonale Oberflächenbedeckung) sein. Ebenso sind einmalige Störungen durch zum Beispiel Fahrzeuge denkbar. Unter der Annahme, dass die Umgebung unverändert bleibt, sollten sich Signaturen in den Spektren genau dann wiederholen, wenn das vom Satelliten abgestrahlte Signal das Hindernis erneut passiert. Dieser Fall tritt nach Ablauf eines Sternentages ein, das heißt, an aufeinander folgenden Tagen um 235,9 Sekunden früher. Das Erscheinungsbild der Störung sollte identisch mit dem Erscheinungsbild am Vortag sein. Bei dynamischen Störungen durch Baumkronen, Tau, etc. können leicht veränderte Signaturen auftreten. Signaturen, welche durch einmalige Störungen im Ausbreitungsweg verursacht werden, werden sich nicht wiederholen. Noch nicht geklärt ist, ob die Effekte, welche durch Mehrwegeausbreitung verursacht werden, auf den beiden Trägerfrequenzen korrelieren.

#### Störungsursachen im Empfänger

Vom Empfänger verursachte Störungen können, müssen aber nicht in den Spektren mehrerer Satelliten gleichzeitig auftreten. Das ist abhängig davon, welches Bauteil im Empfänger die Störungen verursacht. Ist die Empfängeruhr die Ursache, so werden die Signale (Träger L1 und L2) aller parallel getrackten Satelliten gleich beeinflusst, da sich die Verarbeitung ähnlich wie im Satelliten auf die gleiche zeitliche Referenz stützt. Störungen der Hardware, welche nur für die Verarbeitung der Signale eines Satelliten bzw. einer Trägerfrequenz genutzt wird (Bauteil in den einzelnen Kanälen), werden nur im Spektrum des entsprechenden Satelliten bzw. der entsprechenden Trägerfrequenz sichtbar sein. Länge und Wiederholung hängen von der speziellen Störung der Bauteile ab. Um empfängerspezifische Störungen zu bestimmen, ist das Tracken von Satellitensignal an einem Standort mit mehreren Empfängern unterschiedlicher Bauart hilfreich.

## 4 STÖRUNGSSIGNATUREN

Als Ergebnis der spektralen Analyse sind verschiedene Signaturen festgestellt worden. Die Darstellung der Spektren erfolgt stundenweise.

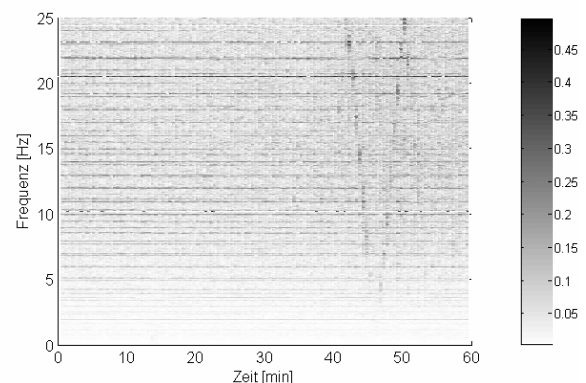
#### Datenlücken

Datenlücken treten im Spektrum dann auf, wenn für ein Analyseintervall von einer Minute nicht die erforderlichen 3000 Samples zur Verfügung stehen. Um die Ergebnisse der Spektralanalyse nicht zu verfälschen, wird in diesem Fall für das betreffende Analyseintervall keine DFT durchgeführt. Daher entsteht in den Stundenspektren eine vertikale Linie mit dem Wert 0 für alle Frequenzen in der Zeitspanne des Intervalls.

Der Fall, dass die erforderlichen Samples nicht zur Verfügung stehen tritt dann ein, wenn der Empfänger Verarbeitungsprobleme hat und keine bzw. als inkorrekt bewertete Daten zur Verfügung stellt. Da die Bereitstellung keiner bzw. inkorrektur Daten mit den Anforderungen (u.a. Integrität, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit) an ein Satellitennavigationssystem kollidiert, besteht der Wunsch, solche Probleme vorhersagbar zu machen und zu eliminieren. Dies setzt jedoch die Kenntnis der Ursachen dafür voraus. Die Vermutung, dass Datenlücken in Zusammenhang mit Störsignaturen in den Spektren stehen, kann nicht nachgewiesen werden. In den untersuchten Spektren sind keine Signaturen im Phasenrauschspektrum erkennbar, die auf diese Effekte hindeuten. So treten Datenlücken sowohl in gestörten, wie auch in ungestörten Spektren auf.

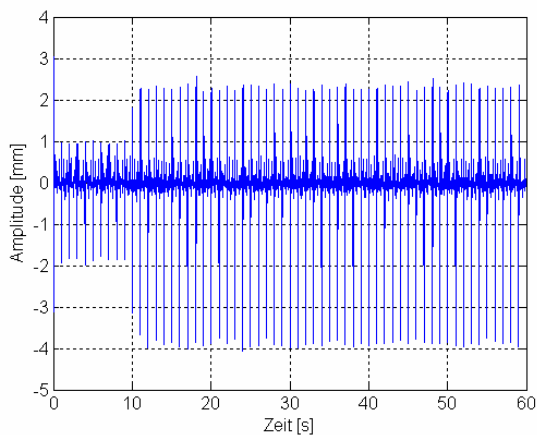
#### Streifen

Streifen konstanter Frequenz über den gesamten Analysebereich, welche insbesondere in den Spektren der Daten der Station Tromsø auftreten deuten auf systematische Effekte hin (Bild 6).

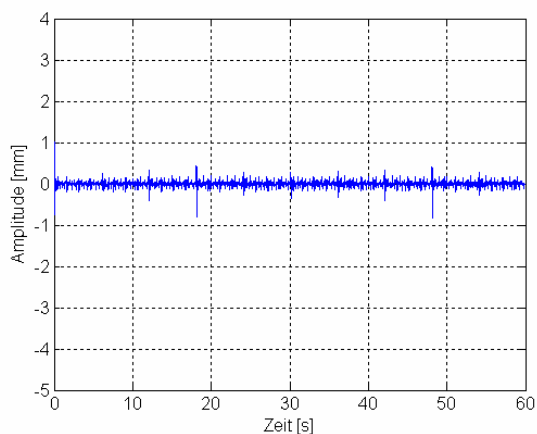


**Bild 6: Stundenspektrum des Satelliten 24 am 30.10.2003 in der Zeit von 16-17 Uhr UTC**

Eine Mittelung der Phasenrauschwerte, die in jeder Minute zum gleichen Zeitpunkt auftreten bestätigt diese Vermutung, allerdings nur für die Spektren für die Station Tromsø (Bild 7). Die systematischen Effekte treten dabei auf beiden Trägerfrequenzen gleichermaßen auf. In den Daten der Station Neustrelitz können sie im Zeitbereich nicht nachgewiesen werden (Bild 8).



**Bild 7: Minutenmittelwerte des Trägers L2 am 30.10.2003 Station Tromsø**

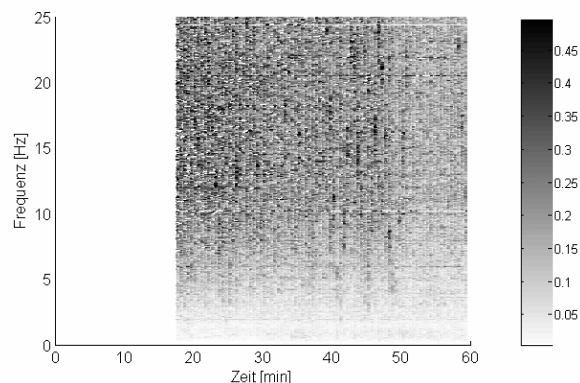


**Bild 8: Minutenmittelwerte des Trägers L2 am 04.05.2004 Station Neustrelitz**

Um zu klären, ob diese systematischen Effekte empfängerspezifisch sind, oder in Abhängigkeit der geographischen Breite entstehen, sind Folgeuntersuchungen von Spektren notwendig, die aus den Daten mehrerer Stationen auf unterschiedlichen Breitengraden gewonnen werden.

### Sprenkel

Sprenkel sind eine scheinbar diffuse Erhöhung einzelner Spektralkomponenten über den gesamten Frequenzbereich (Bild 9).

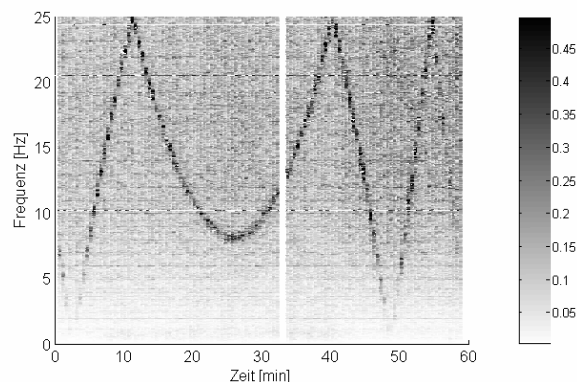


**Bild 9: Stundenspektrum des Satelliten 27 am 30.10.2003 in der Zeit von 18-19 Uhr UTC**

Sie treten insbesondere in niedrigen Elevationswinkeln auf. Dies und die Tatsache, dass sie sich in den Spektren aufeinander folgender Tage wiederholen, lässt als Ursache die Mehrwegeausbreitung zu. Eine weitere, mögliche Interpretation ist das generelle Empfängerverhalten bei niedrigen Elevationen, da in diesem Fall auf Grund der geringeren, empfangenen Signalstärke eine größere Verstärkung des Signals im Empfänger vorgenommen wird. Somit wird auch das im Signal enthaltene Rauschen verstärkt und hebt sich im Spektrum heraus.

### Frequenzmodulationen

Unter Frequenzmodulationen wird die kontinuierliche Änderung der Frequenz einer Signatur in aufeinander folgenden Spektren verstanden (Bild 10).



**Bild 10: Stundenspektrum des Satelliten 8 am 30.10.2003 in der Zeit von 21-22 Uhr UTC**

Die detektierten Frequenzmodulationen unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihrem Erscheinungsbild. Bis auf wenige Ausnahmen wiederholen sie sich nach einem Sternentag, so dass zunächst davon ausgegangen werden kann, dass sie der statischen Mehrwegeausbreitung zugeschrieben werden können. Die Ursache dafür,

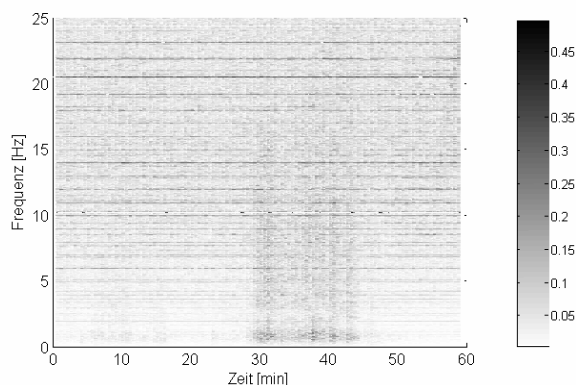


dass sich einige Signaturen nicht in den Spektren aufeinander folgender Tage wiederholen, kann entweder in einem Hindernis liegen, welches einmalig aufgetreten ist, oder aber an einer variierenden Stärke der Ausprägung, so dass bei einer schwachen Ausprägung die Signatur zwar auftritt, in dem Spektrum jedoch nicht erkennbar ist.

Dem widerspricht die Tatsache, dass die Signaturen teilweise parallel in den Spektren zweier Satelliten unterschiedlicher Azimut- und Elevationswinkel sichtbar sind und die Signaturen teilweise in sehr hohen Elevationswinkeln auftreten. Vielmehr scheint als Ursache für das Auftreten dieser Signaturen ein Szenario vorzuliegen, welches den Empfänger zu einem systematischen Fehlverhalten zwingt, das sich als Frequenzmodulation bemerkbar macht.

### Flammen

Flammen sind Signaturen, die sich aus Frequenzkomponenten bis maximal 10 Hz zusammensetzen (Bild 11).

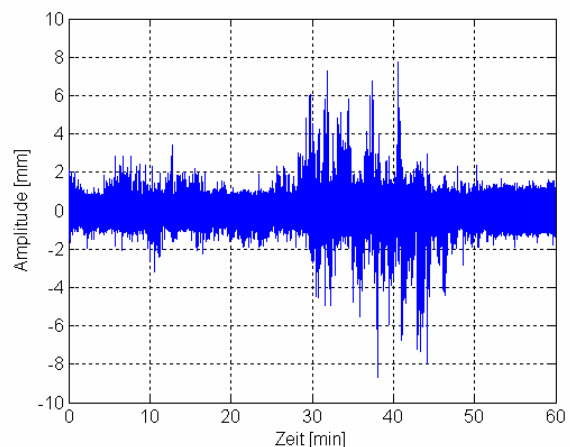


**Bild 11: Stundenspektrum des Satelliten 18 am 30.10.2003 in der Zeit von 21-22 Uhr UTC**

Die Flammensignaturen können nur in den Spektren eines Tages (30.10.2003) nachgewiesen werden, dabei parallel auf mehreren Satelliten, aber nicht zeitsynchron. Dies spricht als Ursache für Troposphäre und Ionosphäre. Eine Zuordnung dieser Störung zu einer Sphäre ist möglich, wenn die Frage der Dispersivität geklärt wird. Als Entscheidungshilfe dient zunächst die Differenz der Rauschspektren. Es kann festgestellt werden, dass sich im Zusammenhang mit den Flammen, die systematischen Streifen in den Rauschspektren der beiden Träger unterschiedlich stark ausbilden und somit im Differenzrauschspektrum der Träger sichtbar sind. Die Flammen selbst können bei einer Skalierung, die als Maximalwert das 40%-Quantil des Differenzphasenrauschens annimmt, nicht detektiert werden. Dies kann daran liegen, dass der ionosphärische Einfluss wesentlich geringer als der Einfluss der systematischen Effekte ist und diese somit das Differenzspektrum dominieren. Wird eine

Skalierung genutzt, die als Maximalwert ein Zehntel dieses Wertes annimmt, so scheinen sich die Flammen im Differenzspektrum abzubilden. Allerdings besteht das Problem, dass bei weiterer Verringerung der Skalierung für eine endgültige Klärung, mögliche ionosphärische Signaturen im Rauschen verschwinden. Somit besteht für weiterführende Untersuchungen die Forderung, das Grundrauschen der Differenzspektren zu bestimmen und zu unterdrücken.

Eine weitere Entscheidungshilfe kann eine Betrachtung des Phasenrauschens im Zeitbereich sein. Bei der Bildung der Rauschdifferenz der Träger L1 und L2 sind erhöhte Amplituden genau in den Zeiten des Auftretens der Flammensignaturen ersichtlich (Bild 12). Diese Differenz kann als relativer Slant TEC interpretiert werden, das heißt, der bis auf einen konstanten Term bestimmte Slant TEC. Große TEC-Schwankungen sind ein Indiz für eine stark aktive Ionosphäre.



**Bild 12: Rauschdifferenz der Träger L1 und L2 des Satelliten 18 am 30.10.2003 in der Zeit von 21-22 Uhr UTC**

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass sich ein Bezug zwischen dem Auftreten der Flammenspektren und einer trägerspezifischen Beeinflussung des Phasenrauschens herstellen lässt. Somit besteht die Möglichkeit, den Flammensignaturen als Störungsursache die Ionosphäre zuzuordnen.

## **5 SCHLUSSFOLGERUNG**

Als Ergebnis der durchgeführten spektralen Analyse von Hochratendaten des GPS-Phasenrauschens sind diverse Störungssignaturen ermittelt worden. Sie können größtenteils als spezifische Empfängerreaktion auf eingehende gestörte Daten interpretiert werden.

Im Fall der Flammensignaturen bilden sich ionosphärische Störungen im Rauschspektrum ab. Bei der alleinigen Betrachtung des Spektralbereiches ist eine eindeutige Klärung der Dispersivität nicht realisierbar, da die Störungen eventuell so niederfrequent sind, dass sie sich nicht im Durchlassbereich des Hochpasses befinden oder aber so schwach ausgeprägt, dass sie im durch systematische Effekte dominierten Rauschen nicht detektierbar sind. Im Zeitbereich ist allerdings ein eindeutiger Zusammenhang zwischen erhöhtem relativen Slant TEC (aktive Ionosphäre) und Flammensignaturen im Rauschspektrum feststellbar.

Unbeantwortet bleibt die Frage nach dem Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Datenlücken und Störungssignaturen.

## 6 LITERATUR

### Skripte und Technical Notes

- [Engl-05] Engler, E., Galileo-Nutzung, Anwendung und Verifikation, TN AP 3140, DLR, Institut für Kommunikation und Navigation, 2005
- [EnSc-06] Engler, E., Schlüter, S., Klaehn, D., Noack, T., Methodical Aspects of Real-time Estimation of Ionospheric Scintillations for GNSS SoL Applications, DLR, 2006
- [Hirr-06] Hirrle, A., Verifikation und Weiterentwicklung eines GPS-/Galileo-Phasenprozessors, Studienarbeit, TU Dresden, 2005
- [Stan-05] Stankov, S., SWIPPA-Ionospheric Storms, TN, DLR, Institut für Kommunikation und Navigation, 2005

### Bücher

- [Brig-89] Brigham, E., FFT Schnelle Fourier-Transformation, Oldenbourg, 1989
- [BrSe-05] Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, 2005
- [Jülg-97] Jülg, T., Einfluss der Mehrwegesignalausbreitung auf die Laufzeit- und Phasenmessungen beim Globalen Navigationssystem GPS, Forschungsbericht 97-28, DLR, 1997
- [Mans-04] Mansfeld, W., Satellitenortung und Navigation, Vieweg, 2004
- [OpSc-99] Oppenheim, A., Schafer, R., Zeitdiskrete Signalverarbeitung, Oldenbourg Verlag München Wien 1999

[PaSp-95]

Parkinson, B., Spilker, J., Global Positioning System: Theory and Applications, Volume1, American Institut of Aeronautics and Astronautics Inc., 1995

### Internet

- [Java-06] Occupation Planning Tool, Software zur Bestimmung von Satellitenbahnen, <http://www.javad.com>
- [KNNZ-06] DLR Neustrelitz, Institut für Kommunikation und Navigation, etterinformationen für die Station Neustrelitz, <http://www.kn.nz.dlr.de/>
- [NaCe-06] Informationen des US-Militärs zu Almanachs von GPS-Satelliten, <http://www.navcen.uscg.gov/>
- [Roth-05] Rothacher, M., Satellitengeodäsie1, Vorlesungsskript, TU München 2005, <http://tau.fesq.tu-muenchen.de>
- [SpWe-06] Informationen zum Atmosphärenwetter, <http://spaceweather.com/>
- [UnTr-06] Universität Tromsø, Institut für Informatik, Wetterinformationen für die Station Tromsø <http://weather.cs.uit.no/>
- [USCo-06] Informationen zum Status der GPS-Satelliten, Homepage der US Coast Guard, <http://cgls.uscg.mil/pipermail/nanu/>